

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CAMPUS I – CAMPINA GRANDE
ÁREA GEOTÉCNICA

AVALIAÇÃO REOLÓGICA DE CIMENTOS ASFÁLTICOS DE
PETRÓLEO MODIFICADOS COM ÓLEO DE SOJA E DE MILHO

Autor: Antonio Carlos Xavier Portugal

Dissertação Apresentada ao Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande – Campina Grande/PB, como parte dos requisitos necessários para obtenção do Título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL.

Campina Grande – Paraíba
AGOSTO – 2016

ANTONIO CARLOS XAVIER PORTUGAL

Dissertação Apresentada ao Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande – Campina Grande/PB, como parte dos requisitos necessários para obtenção do Título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL.

Área de Concentração – Geotecnia

Prof. D. Sc Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena
Orientadora

Prof. D. Sc Adriano Elísio de Figueirêdo Lopes Lucena
Co-orientador

Campina Grande – Paraíba
AGOSTO – 2016

FOLHA DE APROVAÇÃO

Autor: Antonio Carlos Xavier Portugal

Título: **Avaliação reológica de cimentos asfálticos de petróleo modificados com óleo de cozinha.**

Área de concentração: Geotécnica

Dissertação defendida e aprovada em: 15 / 08 / 2016

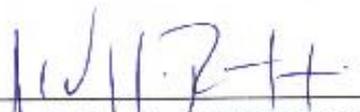
Banca Examinadora

(Assinatura):



Prof. PhD. (Examinador Externo) Luis Alberto Herrmann do Nascimento
CENPES/PETROBRAS

(Assinatura):



Prof. D. Sc (Examinador Interno) John Kennedy Guedes Rodrigues
Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

(Assinatura):



Prof. D. Sc (Orientadora) Leda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena
Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

(Assinatura):



Prof. D. Sc (Co-orientador) Adriano Elísio de Figueirêdo Lopes Lucena
Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu pai Ismael (*in memoriam*) e minha mãe Nádia. Em especial a minha esposa Rusilane e minhas filhas Raissa e Rayane, pela confiança e pelo apoio incondicional.

A palavra convence, mas o exemplo arrasta!
(Madre Teresa de Calcutá)

AGRADECIMENTOS

À Deus por ter proporcionado mais esta oportunidade em minha vida.

Ao meu pai Ismael (*in memoriam*) e minha mãe Nádia que sempre acreditaram e me deram a liberdade de pensar e agir.

A minha esposa Rusilane pelo amor, compreensão, apoio, muita paciência e por se fazer presente em todos os momentos.

As minhas filhas Raissa e Rayane, meus tesouros, pelo amor, incentivo, ajuda e paciência.

A minha orientadora professora Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena, pela oportunidade e confiança depositada, pela orientação sempre oportuna, pelos valiosos ensinamentos e dedicação, fundamentais para a conclusão deste trabalho.

Ao professor Adriano Elísio de Figueirêdo Lopes Lucena, pela orientação paciente e valiosos ensinamentos.

A professora Veruschka Escarião Dessoles Monteiro, pela oportunidade concedida.

Aos professores Gilmar Trindade de Araújo e Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça, pela ajuda oportuna nos momentos de sufoco.

Aos meus colegas de mestrado Denion, Gutemberg, Francisco, Cláudio e Raquel, pela parceria e amizade.

Ao mestrando Daniel Beserra Costa, pela amizade e ajuda nos ensaios de reologia.

Aos técnicos de laboratório Jadilson Trigueiro e Joseildo Cunha, pela amizade e importante ajuda nos experimentos.

A todos os professores do DEC/UFCG, pelo conhecimento repassado, pela amizade e consideração.

A todos que direta e indiretamente contribuíram para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

A emissão de fumos de asfalto, durante as etapas de usinagem e compactação, é prejudicial à saúde humana e ao meio ambiente. Neste sentido tem-se desenvolvido pesquisas voltadas para a diminuição das temperaturas nas etapas citadas anteriormente, para produção de misturas asfálticas mornas com a finalidade de serem menos prejudiciais aos trabalhadores que estão diretamente em contato com o asfalto. A grande produção nacional de grãos, soja e milho, gera uma quantidade significativa de resíduos de óleo de cozinha e quando descartado de forma irregular, prejudica a tubulação de esgoto, rios e o solo. Esta pesquisa visa o estudo da incorporação do óleo de soja e de milho, tendo em vista ocuparem o primeiro e segundo lugares, respectivamente, na produção nacional de grãos, em substituição parcial ao CAP 50/70 e ao AMP 55/75. Os óleos foram adicionados nas condições novo e pós-consumo (residual), em teores de 1%, 2% e 3%. As amostras foram analisadas por meio dos ensaios de penetração, ponto de amolecimento, viscosidade rotacional, envelhecimento em estufa de filme fino rotativo (RTFO), especificação do Grau de Desempenho, MSCR e varredura de frequência. Os resultados mostraram que a adição de 1% de óleo de soja e milho (novo e residual) mantém as características físicas e reológicas sem comprometer o desempenho do CAP 50/70 ou do AMP 55/75. A redução da temperatura de usinagem e compactação foi obtida em média de 2,7°C e 5,6°C para 1% de óleo residual de soja e milho, respectivamente, com emprego do CAP 50/70 e 3,8°C e 4,10°C para 1% de óleo residual de soja e milho, respectivamente, quando utilizado AMP 55/75, quando considerado apenas o critério da curva de viscosidade. Nos ensaios reológicos verificou-se que a adição de óleo de soja e de milho, interferem no comportamento do CAP diminuindo a viscosidade de acordo com o aumento do teor e da temperatura. Na pesquisa não foi verificada diferença significativa na utilização de óleo novo ou residual, contribuindo assim para o emprego ecologicamente correto do óleo residual.

PALAVRAS-CHAVE: Ligante asfáltico, Óleo de Soja, Óleo de Milho, Óleo residual, Mistura Morna.

ABSTRACT

The emission of asphalt fumes, during the steps of machining and compaction, is harmful to the human health and the environment. In this perspective researches have are being developed towards the decrease of the temperatures of the steps previously mentioned, producing warm asphaltic mixes aiming for the goal of being less harmful to the workers directly involved with the asphalt production. This research studied the incorporation of soy and corn oil, as they are respectively first and second on the national grain production, partially replacing PAC 50/70 and PMA 55/75. The oil was inserted as new and after consumption (residual), using levels of 1%, 2% and 3% of soy oil and corn oil. The samples were analyzed by the tests of penetration, softening point, rotational viscosity, Rolling Thin Film Oven Test, performance grade specification, MSCR and frequency sweep. The results show that adding 1% of soy and corn oil (new and residual) maintain the physical and rheological characteristics without compromising the performance of the PAC 50/70 and PMA 55/75. The average reduction of temperature of machining and compaction was 2,7°C and 5,6°C to the residual soy and corn oil respectively using PAC 50/70 and 3,8°C and 4,1°C using PAC 55/75, only taking in consideration the viscosity curve. In the rheological tests, it was observed, that adding soy and corn oil interfere on the PAC and PMA behavior lowering its viscosity as you raise the oil percentage and the temperature. During this research, it could not be verified a notorious difference between the new oil and the old, thus contributing to the environmentally friendly use of the residual oil.

Key-words: asphalt binder, soybean oil, corn oil, residual oil, Warm Mix.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Classificação por faixa de temperatura (D'angelo, 2008a – Adaptado CCR Nova Dutra)	27
Figura 2.2 - Brasil - Percentagem da produção total por produto, fonte CONAB 2016.....	34
Figura 3.1 - Primeira Etapa - Caracterização físico-química dos óleos.....	42
Figura 3.2 - Segunda Etapa – Caracterização física e reológica dos CAP Puros e Modificados.....	42
Figura 3.3 - Agitador Mecânico, marca FISATOM, modelo 722D.....	45
Figura 3.4 - Penetrômetro Solotest (Ensaio de Penetração)	46
Figura 3.5 - Equipamento para ensaio de Ponto de Amolecimento.....	47
Figura 3.6 - Viscosímetro DV-III Ultra e DV-II+ Pro (Ensaio Viscosidade Rotacional)	48
Figura 3.7 - Estufa Marca Matest (Envelhecimento a curto prazo RTFO).....	49
Figura 3.8 - Reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR), modelo Discovery.....	50
Figura 3.9 - Representação gráfica do modo de aplicação das tensões ou deformações cisalhantes, dos parâmetros e resultados obtidos com o DSR. (Fonte: Bernucci <i>et al</i> , 2007)	51
Figura 3.10 - Representação das relações G^* , G' , G'' e δ (Fonte: Mothé, 2009)	52
Figura 3.11 - Comportamento reológico típico de CAP: curvas-mestre (frequência). [FAXINA, original de Bahia e Anderson (1995)]	55
Figura 3.12 - Comportamento reológico típico de ligantes asfálticos: curvas isócronas (temperatura). [FAXINA, original de Bahia e Anderson(1995)	55
Figura 3.13 - a) principio do teste de MSCR; b) deformação <i>versus</i> tempo para um ciclo de <i>creep</i> . (Fonte: FERNANDES, 2009).	59
Figura 4.1 - Espectro de infravermelho do Óleo de Soja Novo.....	64
Figura 4.2 - Espectro de infravermelho do Óleo de Soja Residual	64
Figura 4.3 - Espectro de infravermelho do Óleo de Milho Novo	65
Figura 4.4 - Espectro de infravermelho do Óleo de Milho Residual.....	65
Figura 4.5 - Ensaio de Penetração (CAP 50/70 com óleo de Soja).....	66
Figura 4.6 - Ensaio de Penetração (CAP 50/70 com óleo de Milho)	67
Figura 4.7 - Ensaio de Penetração (AMP 55/75 com óleo de Soja)	68
Figura 4.8 - Ensaio de Penetração (AMP 55/75 com óleo de Milho).....	68
Figura 4.9 - Ponto de Amolecimento (CAP 50/70 com óleo de Soja).....	72
Figura 4.10 - Ponto de Amolecimento (CAP 50/70 com óleo de Milho)	72
Figura 4.11 - Ponto de Amolecimento (AMP 55/75 com óleo de Soja).....	73
Figura 4.12 - Ponto de Amolecimento (AMP 55/75 com óleo de Milho)	73
Figura 4.13 - CAP 50/70 - Viscosidade Rotacional (Óleo de Soja novo e residual).....	80

Figura 4.14 - CAP 50/70 - Viscosidade Rotacional-RTFO (Óleo de Soja novo e residual) ..	80
Figura 4.15 - CAP 50/70 - Viscosidade Rotacional (Óleo de Milho novo e residual)	81
Figura 4.16 - CAP 50/70 - Viscosidade Rotacional-RTFO (Óleo de Milho novo e residual) .	81
Figura 4.17 - AMP 55/75 - Viscosidade Rotacional (Óleo de Soja novo e residual)	82
Figura 4.18 - AMP 55/75 - Viscosidade Rotacional-RTFO (Óleo de Soja novo e residual) ..	82
Figura 4.19 - AMP 55/75 - Viscosidade Rotacional (Óleo de Milho novo e residual)	83
Figura 4.20 - AMP 55/75 - Viscosidade Rotacional-RTFO (Óleo de Milho novo e residual) .	83
Figura 4.21 - Variação do PG com CAP 50/70 e Óleo de Soja.....	86
Figura 4.22 - Variação do PG com CAP 50/70 e Óleo de Milho	86
Figura 4.23 - Variação do PG com AMP 55/75 e Óleo de Soja	87
Figura 4.24 - Variação do PG com AMP 55/75 e Óleo de Milho.....	87
Figura 4.25 - Curvas do $G^*/\text{sen } \delta$ versus temperatura - CAP 50/70 (óleo de soja novo e residual)	89
Figura 4.26 - Curvas do $G^*/\text{sen } \delta$ versus temperatura - CAP 50/70 - pós-RTFO (óleo de soja novo e residual)	89
Figura 4.27 - Curvas do $G^*/\text{sen } \delta$ versus temperatura - CAP 50/70 (óleo de milho novo e residual)	90
Figura 4.28 - Curvas do $G^*/\text{sen } \delta$ versus temperatura - CAP 50/70 - pós-RTFO (óleo de milho novo e residual)	90
Figura 4.29 - Curvas do $G^*/\text{sen } \delta$ versus temperatura – AMP 55/75 (óleo de soja novo e residual)	91
Figura 4.30 - Curvas do $G^*/\text{sen } \delta$ versus temperatura – AMP 55/75 - pós-RTFO (óleo de soja novo e residual)	91
Figura 4.31 - Curvas do $G^*/\text{sen } \delta$ versus temperaturas – AMP 55/75 (óleo de milho novo e residual)	92
Figura 4.32 - Curvas do $G^*/\text{sen } \delta$ versus temperatura – AMP 55/75 - pós-RTFO (óleo de milho novo e residual)	93
Figura 4.33 - (Jnr) e (%R) utilizando óleo de soja com CAP 50/70 a 0,1 kPa e 3,2 kPa.	96
Figura 4.34 - (Jnr) e (%R) utilizando óleo de milho com CAP 50/70 a 0,1 kPa e 3,2 kPa	96
Figura 4.35 - (Jnr) e (%R) utilizando óleo de soja com AMP 55/75 a 0,1 kPa e 3,2 kPa.....	97
Figura 4.36 - (Jnr) e (%R) utilizando óleo de milho com AMP 55/75 a 0,1 kPa e 3,2 kPa.....	97
Figura 4.37 - Percentual de Compliância não-recuperável CAP 50/70	98
Figura 4.38 - Percentual de Compliância não-recuperável AMP 55/75.....	98
Figura 4.39 - Variação de G^* e $\text{Tan } \delta$ versus temperatura (CAP 50/70 / óleo de soja).....	100
Figura 4.40 - Variação de G^* e $\text{Tan } \delta$ versus temperatura (CAP 50/70 / óleo de soja pós-RTFO).....	101
Figura 4.41 - Variação de G^* e $\text{Tan } \delta$ versus temperatura (CAP 50/70 / óleo de milho)	102

Figura 4.42 - Variação de G^* e $\tan \delta$ versus temperatura (CAP 50/70 / óleo de milho pós-RTFO).....	102
Figura 4.43 - Variação de G^* e $\tan \delta$ versus temperatura (AMP 55/75 - óleo de soja).....	103
Figura 4.44 - Variação de G^* e $\tan \delta$ versus temperatura (AMP 55/75 / óleo de soja pós-RTFO).....	104
Figura 4.45 - Variação de G^* e $\tan \delta$ versus temperatura (AMP 55/75 - óleo de milho).....	104
Figura 4.46 - Variação de G^* e $\tan \delta$ versus temperatura (AMP 55/75 / óleo de milho pós-RTFO).....	105
Figura 4.47 - Curva Mestre G^* em varredura de frequência (CAP 50/70 / Óleo de soja)	106
Figura 4.48 - Curva Mestre $\delta(^{\circ})$ em varredura de frequência (CAP 50/70 - Óleo de soja) ..	107
Figura 4.49 - Curva Mestre G^* em varredura de frequência (CAP 50/70 / Óleo de milho) ..	107
Figura 4.50 - Curva Mestre $\delta(^{\circ})$ em varredura de frequência (CAP 50/70 - Óleo de milho)	108
Figura 4.51 – Curva Mestre G^* em varredura de frequência (AMP 55/75 / Óleo de soja) ...	109
Figura 4.52 - Curva Mestre $\delta(^{\circ})$ em varredura de frequência (AMP 55/75 - Óleo de soja) .	110
Figura 4.53 - Curva Mestre G^* em varredura de frequência (AMP 55/75 / Óleo de milho) ..	110
Figura 4.54 - Curva Mestre $\delta(^{\circ})$ em varredura de frequência (AMP 55/75 - Óleo de milho)	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Safra Mundial de Soja 2015/2016 – 12º Levantamento do USDA – Abril/16....	34
Tabela 2.2 - Safra Mundial de Milho 2015/2016 – 12º Levantamento do USDA – Abril/16 ..	34
Tabela 2.3 - Viscosidade dos óleos de milho e soja, em função da temperatura (Fonte: CANCIAM, 2010 - Adaptado).....	36
Tabela 3.1 - Informações nutricionais do óleo de milho e óleo de soja	41
Tabela 3.2 - Caracterização do Óleo de Soja e Óleo de Milho	43
Tabela 3.3 - Classificação quanto ao valor de Jnr (AASHTO M320-09) (Pamplona <i>et al</i> , 2012 - adaptado)	60
Tabela 3.4 – Percentual de recuperação recomendado pelo FHWA. (D'Angelo, 2011) (Pamplona <i>et al</i> , 2012 - adaptado).....	60
Tabela 4.1 - Caracterização físico-química do óleo de soja e de milho	61
Tabela 4.2 - Penetração Retida (CAP 50/70)	69
Tabela 4.3 - Penetração Retida (AMP 55/75).....	69
Tabela 4.4 - Índice de Suscetibilidade Térmica (CAP 50/70).....	75
Tabela 4.5 - Índice de Susceptibilidade Térmica (AMP 55/75)	76
Tabela 4.6 - Variação de Massa (RTFO - CAP 50/70).....	77
Tabela 4.7 - Variação de Massa (RTFO – AMP 55/75).....	77
Tabela 4.8 - Redução de temperatura CAP 50/70	85
Tabela 4.9 - Redução de temperatura AMP 55/75.....	85
Tabela 4.10 - Tabela resumo do ensaio MSCR	95
Tabela 4.11 - Nível de tráfego obtido em função do Jnr	99

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABIOVE	Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABOISSA	Aboissa Óleos Vegetais
AMP	Asfaltos Modificados por Polímeros
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustível
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
ASTM	American Society for Testing and Material
BBR	Reômetro de Flexão em Viga
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
cm	Centímetro
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
Cos	Cosseno
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte
DSR	Reômetro de Cisalhamento Dinâmico
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FHWA	Federal Highway Administration
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
G*	Módulo Complexo de Cisalhamento
G*/senδ	Parâmetro SUPERPAVE para Deformação Permanente
G'	Módulo de armazenamento em Regime Oscilatório
G''	Módulo de Dissipação em Regime Oscilatório
δ	Ângulo de Fase
γ _{max}	Máxima Deformação
GEE	Gases do Efeito Estufa
HMA	Mistura Asfáltica Quente (Hot Mix Asphalt)
HWMA	Mistura Asfáltica Semimornas
H ₂ S	Sulfeto de Hidrogênio

IAL	Instituto Adolfo Lutz
ISC	Índice de Susceptibilidade Térmica
Jnr	Complância não-recuperável
kcal	Kilo Calorias
kJ	Kilo Jaule
kPa	Kilo Pascal
LEP	Laboratório de Engenharia de Pavimentos
log	Logaritmo
mg/h	Miligrama por hora
mm	Milimetro
MSCR	Fluência e Recuperação sob Tensões Múltiplas
NBR	Norma Brasileira Registrada
NIOSH	Instituto Nacional para a Segurança e Saúde Ocupacional
NO _x	Óxido Nitroso
OMA	Óleo de Cozinha Residual
Pa.s	Pascal segundo
PG	Grau de Desempenho
PNMC	Política Nacional sobre a Mudança do Clima
%R	Percentual de Recuperação
rad/s	Radiano por segundo
RAP	Asfalto Reciclado
RCRT	Fluência Repetida e Recuperação
REDUC	Refinaria Duque de Caxias
RTFO	Rolling Thin-Film Over
SBS	Estireno-Butadieno-Estireno
SHRP	Strategic Highway Research Program
SO ₂	Dióxido de Enxofre
SUPERPAVE	Superior Performing Asphalt Pavements
Tan	Tangente
τ_{\max}	Máxima Tensão de Cisalhamento
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande
UFS	Universidade Federal de Sergipe
USDA	United States Department of Agriculture

WMA

Warm Mix Asphalt

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Objetivos	18
1.1.1	<i>Objetivos específicos</i>	19
1.2	Organização do trabalho	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	Infraestrutura rodoviária.....	21
2.2	Ligantes Asfálticos.....	22
2.2.1	<i>Generalidades</i>	22
2.2.2	<i>Caracterização dos cimentos asfáltico de petróleo (CAP)</i>	23
2.3	Meio ambiente e legislação ambiental	24
2.4	Misturas Asfálticas Mornas	26
2.4.1	<i>Processo de produção de Misturas Asfálticas Mornas</i>	30
2.4.2	<i>Experiência Brasileira em Misturas Asfálticas Mornas</i>	31
2.5	Óleo de Soja e Óleo de Milho	33
2.5.1	<i>Produção e características gerais</i>	33
2.5.2	<i>Óleo de soja</i>	36
2.5.3	<i>Óleo de milho</i>	37
2.5.4	<i>Utilização de óleo de cozinha em pavimentação</i>	37
2.6	Considerações Finais	39
3	MATERIAIS E MÉTODOS	40
3.1	Materiais.....	40
3.1.1	<i>Ligantes asfálticos</i>	40
3.1.2	<i>Óleo de Soja e de Milho</i>	40
3.2	Métodos.....	41
3.2.1	<i>Caracterização dos óleos de soja e milho</i>	43
3.2.2	<i>Espectroscopia de Absorção na Região do Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)</i>	43
3.2.3	<i>Preparação das misturas</i>	44
3.2.4	<i>Caracterização dos ligantes</i>	45
3.2.5	<i>Reologia (DSR)</i>	49
3.2.6	<i>Varredura de frequência</i>	56

3.2.7	<i>Grau de desempenho (PG)</i>	56
3.2.8	<i>Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)</i>	57
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	61
4.1	Resultados de caracterização físico-química dos óleos.....	61
4.1.1	<i>Ensaio de caracterização físico-química dos óleos de soja e de milho</i>	61
4.1.2	<i>Ensaio de espectroscopia (FTIR) dos óleos de soja e de milho</i>	63
4.2	Propriedades físicas do CAP modificados	66
4.2.1	<i>Ensaio de penetração</i>	66
4.2.2	<i>Ensaio de ponto de amolecimento (método anel e bola)</i>	71
4.2.3	<i>Procedimento de envelhecimento de envelhecimento a curto prazo (RTFO)</i> . 76	
4.2.4	<i>Ensaio de viscosidade rotacional</i>	78
4.2.5	<i>Redução da temperatura de usinagem e compactação das misturas</i>	83
4.3	Resultados ensaios reológicos	85
4.3.1	<i>Ensaio de PG (Performance Graded)</i>	85
4.3.2	<i>Ensaio MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery)</i>	93
4.3.3	<i>Ensaio Reológicos no Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR)</i>	99
4.4	Considerações Finais	111
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	113
5.1	Conclusões.....	113
5.2	Sugestões para futuras pesquisas	114
6	REFERÊNCIAS	116

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

A demanda mundial por petróleo tem direcionado pesquisas na utilização de materiais alternativos ao Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) com a finalidade de diminuir o consumo de recursos naturais, reduzir o consumo de energia, e em alguns casos melhorar o desempenho do pavimento. Assim, é fundamental avaliar a viabilidade técnica do emprego de aditivos junto ao CAP na pavimentação. A introdução e aplicação de materiais alternativos e sustentáveis pode vir a ter uma representatividade significativa na economia nacional e no meio ambiente.

Atualmente a maior parte dos pavimentos executados são oriundos de misturas asfálticas usinadas à quente, onde é necessária quantidade significativa de energia para o aquecimento, em razão disto são liberados materiais poluidores na atmosfera.

As misturas asfálticas mornas ou Warm-Mix Asphalt (WMA) diferem das misturas asfálticas convencionais pelas temperaturas nas quais são produzidas. As misturas asfálticas à frio são executadas em temperatura ambiente, variando entre 20°C e 50°C, enquanto as misturas asfálticas a quente são produzidas em temperaturas variando entre 140°C e 180°C. As misturas asfálticas “mornas” são produzidas em temperaturas intermediárias entre 105°C e 135°C (BUDNY, 2012).

Segundo Rubio *et al* (2012) trabalhar com as misturas asfálticas em temperaturas elevadas produz emissão de gases que contribuem para o efeito estufa, bem como outras substâncias químicas poluentes que afetam a qualidade do ar. Este impacto ambiental negativo colabora para o aquecimento global.

A emissão de fumos de asfalto, durante a usinagem e compactação, tem despertado interesse da comunidade científica para realização de pesquisas, tais como: Kristjansdottir (2006) que verificou o desempenho de misturas mornas em regiões de clima frio com emprego de Zeolita e Sasobit, Rubio *et al* (2013) que analisou a emissão gases em dois trechos de estrada, um com mistura quente e outro com mistura morna, e Podolsky *et al* (2016) que analisou a diminuição da resistência do CAP com adição de material da destilação da isossorbida. Todas estas pesquisas tiveram como objetivo avaliar a diminuição das temperaturas em misturas mornas.

Os benefícios diretos e imediatos das misturas asfálticas mornas são a redução de energia na produção da mistura, necessária para atingir altas temperaturas que permitam atingir a viscosidade ideal do CAP para envolver adequadamente os agregados, boa trabalhabilidade e fácil compactação. Quando se reduz a temperatura, em todas ou em pelo menos uma destas fases, sem perder as características técnicas, há redução de fumos e emissões, nas usinas e nas obras, além de menor envelhecimento do CAP, preservando suas características de flexibilidade por mais tempo (BUDNY, 2012).

Segundo a Associação Brasileira das Industrias de Óleos Vegetais (ABIOVE, 2012), apenas no Brasil, entre os anos de 2003 e 2013, houve um aumento de 33,84% na produção de óleo vegetal, paralelamente o consumo doméstico, no mesmo período, aumentou em 92,62%.

A destinação inadequada do óleo residual, proveniente das atividades de cocção, poderá acarretar prejuízos significativos para o meio ambiente se depositado diretamente no solo ou lançado em cursos de água (AZAHAR *et al*, 2016). Portanto, reciclagem de resíduos, como o óleo de cozinha na modificação do CAP pode ser uma forma sustentável para minimizar o descarte de lixo e, ao mesmo tempo, reduzir o uso de recursos naturais.

Diante do alto consumo de óleo vegetal, uma das soluções possíveis para reaproveitamento do resíduo gerado é o emprego destes para a diminuição das temperaturas de trabalho em misturas mornas.

Segundo a CONAB (2016), diante da produção nacional grãos, a soja lidera com 48% e milho em segundo lugar com 39%. Alternativas para o reuso do óleo residual é uma solução ecologicamente correta para o descarte, em substituição ao lançamento inadequado no meio ambiente.

Esta pesquisa levou em consideração, o emprego do óleo de soja e de milho, por terem a primeira e segunda produção nacional de grãos, respectivamente, para produção de misturas asfálticas mornas.

1.1 Objetivos

Avaliar o efeito da incorporação de óleo de soja e de milho, novo e residual, sobre as propriedades físicas e reológicas do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP).

1.1.1 *Objetivos específicos*

- determinar as características físico-químicas do óleo de soja e de milho;
- estudar as propriedades físicas e reológicas dos CAPs puro e modificados com óleo de soja e de milho;
- avaliar o envelhecimento a curto prazo dos ligantes modificados com os óleos estudados;
- verificar a viabilidade de incorporação dos óleos residuais de soja e de milho no CAP, a fim de promover um descarte adequado destes resíduos.

1.2 **Organização do trabalho**

Esta dissertação encontra-se escrita e organizada nos seguintes capítulos:

Capítulo 1: Introdução

Este capítulo apresenta um breve histórico do tema e os objetivos para o desenvolvimento do trabalho.

Capítulo 2: Revisão Bibliográfica

Neste capítulo são apresentados aspectos relacionados à infraestrutura rodoviária, características dos ligantes asfálticos e óleos utilizados na pesquisa, meio ambiente e processos para obtenção de misturas mornas. Também foi abordado os ensaios físico-químico e reológicos necessários à obtenção dos resultados.

Capítulo 3: Materiais e Métodos

Este capítulo trata dos materiais, equipamentos e planejamento dos ensaios laboratoriais para o CAP e óleos, referenciando as normas regulamentadoras dos mesmos.

Capítulo 4: Resultados e Discussões

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios realizados. Os resultados são analisados e comparados com as normas empregadas e outros trabalhos da literatura.

Capítulo 5: Conclusões e Sugestões

Neste capítulo são apresentadas as conclusões das análises e comparações dos resultados e apresentadas sugestões para pesquisas futuras.

Capítulo 6: Referências

Neste capítulo são apresentadas as referências literária consultadas para o desenvolvimento deste trabalho.

CAPÍTULO 2

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Infraestrutura rodoviária

O relatório gerencial da CNT (2015) verificou que existem no país 1.720.607 km de rodovias, dos quais apenas 213.299 km são pavimentados, isto é, 12,4% da malha, das quais 66.712 km são federais. Destas, apenas 8,7% são de pista dupla (5.830 Km), 2,4% (1.587 km) são vias em fase de duplicação e 88,9% (59.295 km) são pista simples.

O Brasil, no que se refere à infraestrutura rodoviária, teve um ínfimo crescimento da sua malha no período de 2004 a 2015, em comparação com o crescimento da frota de veículos e do número de acidentes. Comparativamente, enquanto a malha pavimentada cresceu apenas 14,7% nos últimos 10 anos, a frota total de veículos cresceu 118,7% (CNT, 2015).

O índice de competitividade global do Fórum Econômico Mundial, divulgado em setembro de 2015 no Relatório gerencial CNT de rodovias, classifica a qualidade das rodovias brasileiras, estas encontram-se na 121ª posição de 140 países analisados atrás de países como o Chile (35ª), Uruguai (95ª), Argentina (108ª), Bolívia (109ª) e Peru (111ª), todos situados na América do Sul.

A má qualidade das rodovias, motivada em parte por uma insuficiente manutenção, oferece riscos a todos os usuários. Implica também em custos elevados para a restauração dos pavimentos, o que decorre de um processo de deterioração que requer soluções técnicas mais robustas e onerosas para a reversão deste cenário.

A utilização de óleo de soja e óleo de milho residual pode vir a diminuir os custos de produção de CAP, haja vista a necessidade de menos combustível para o aquecimento na usinagem, diminuir a emissão de gases poluidores ao meio ambiente e ser menos prejudicial aos trabalhadores na compactação das misturas asfálticas em campo.

2.2 Ligantes Asfálticos

2.2.1 Generalidades

O Cimento Asfáltico de Petróleo é um ligante betuminoso que provém da destilação do petróleo e que tem a propriedade de ser um adesivo termoviscoplastico, impermeável à água e pouco reativo. A baixa reatividade química a agentes não evita que esse material possa sofrer, no entanto, um processo de envelhecimento por oxidação pelo contato com o ar e a água.

No Brasil utiliza-se a denominação CAP para designar esse produto semi-sólido a temperaturas baixas, viscoelástico à temperatura ambiente e viscoso a altas temperaturas, e que se enquadra em limites de consistência para determinadas temperaturas. A característica de termoviscoelasticidade desse material manifesta-se no comportamento mecânico, sendo suscetível à velocidade, ao tempo, à intensidade de carregamento, e à temperatura de serviço. O comportamento termoviscoelástico é mais comumente assumido do que o termoviscoplastico, com suficiente aproximação do real comportamento do material (BERNUCCI *et al*, 2007).

O CAP é formado por compostos saturados (S), aromáticos (A), resinas (R) e asfaltenos (A), sendo caracterizado normalmente por sua composição SARA. As propriedades físicas, mecânicas e reológicas do asfalto dependem basicamente da sua composição química, e em particular da proporção entre asfaltenos e maltenos. Os asfaltenos constituem de 5 a 25% do asfalto e são compostos polares de maior massa molar e insolúveis em n-heptano, enquanto os maltenos são constituídos por resinas, compostos aromáticos e saturados, solúveis em n-heptano e de menor massa molar (FERNANDES, 2009).

Segundo Soares *et al* (2002) apud Mothé (2009) o CAP modificado é aquele que recebeu a adição de um agente modificador de origem natural, sintética ou polimérica. Mesmo que os ligantes convencionais, ou seja sem qualquer modificação, sejam adequados para uso em pavimentos, alguns fatores contribuem progressivamente para a utilização desses modificadores tais como:

- aumento no volume do tráfego;
- aumento no peso de caminhões e demais veículos;
- aumento da carga por eixo em veículos pesados.

O polímero SBS (estireno-butadieno-estireno) tem sido muito empregado para modificar o asfalto, tanto para pavimentação como para aplicações industriais, apresentando comportamento melhor que asfalto convencional. O asfalto modificado com SBS tem uma vida útil superior ao asfalto convencional. O SBS combina as propriedades termoplásticas e elastoméricas e sua utilização, em larga escala nas últimas décadas, tem sido norteadada de excelentes resultados, pois este sistema apresenta recuperação elástica e resistência a tração por compressão diametral superior aos ligantes convencionais. Essas propriedades são essenciais para que o revestimento asfáltico permaneça resistente e flexível em toda gama de tensões e temperaturas a que está sujeito (ALMEIDA JÚNIOR, 2012).

Segundo Yildirim (2007) pavimentos modificados por polímeros apresentam alta resistência à deformação permanente e a formação de trincas térmicas, diminuindo o trincamento por fadiga e reduzindo a susceptibilidade térmica.

2.2.2 Caracterização dos cimentos asfáltico de petróleo (CAP)

A partir do ano de 2005, por meio da Resolução 019/2005 da Agência Nacional de Petróleo (ANP), foi adotada uma nova especificação para os CAPs empregados em serviços de pavimentação.

Além da ANP, o DNIT, por meio da Norma 095/2006 (Cimentos Asfálticos de Petróleo – Especificação do Material), regulamenta as especificações do CAP, segundo sua procedência. Esta mesma Norma, classifica os Cimentos Asfálticos de Petróleo em CAP-30/45, CAP-50/70, CAP-85/100 e CAP-150/200.

Os ensaios de caracterização elencados por essas normas são: penetração, viscosidade, ponto de amolecimento, ductilidade, solubilidade, durabilidade, ponto de fulgor e massa específica.

Em complementação aos ensaios de caracterização supracitados são realizados, baseados na metodologia SUPERPAVE, ensaios reológicos relacionados ao desempenho em serviço. Essas análises utilizam vários equipamentos, dentre estes o reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) e não apenas ensaios empíricos (MOTHÉ, 2009).

As propriedades reológicas dos ligantes asfálticos podem ser separadas em duas categorias: propriedades reológicas fundamentais e propriedades reológicas empíricas. As empíricas correspondem às medidas obtidas de ensaios de natureza puramente empírica, dentre as quais as mais comuns são as medidas de

penetração, de ponto de amolecimento, de viscosidade Saybolt Furol, de resiliência, de ductilidade e de retorno elástico. As fundamentais são fornecidas por ensaios que determinam propriedades fundamentais, como viscosidade aparente, medida no viscosímetro rotacional (Brookfield), viscosidade cinemática, medida no viscosímetro capilar, módulo complexo, ângulo de fase, módulo de armazenamento, módulo de dissipação e viscosidade complexa, medidas no reômetro de cisalhamento (DSR), rigidez sob baixas temperaturas e taxa de relaxação sob baixas temperaturas, obtidas no reômetro de flexão em viga (BBR) (FAXINA, 2006).

Segundo Anderson *et al* (1991) apud Faxina (2006) os ensaios de cisalhamento dinâmico são considerados mais efetivos na caracterização do comportamento viscoelástico dos ligantes asfálticos. As deformações empregadas nesse tipo de ensaio são relativamente pequenas, tornando fácil a avaliação do material na região de viscoelasticidade linear. Além disso, os ensaios dinâmicos simulam razoavelmente a ação de cargas do tráfego, que representam as principais solicitações que o CAP está sujeito em campo.

2.3 Meio ambiente e legislação ambiental

O protocolo de Quioto foi o resultado da 3ª Conferência das Partes da Convenção das Nações Unidas sobre mudanças climáticas, realizada no Japão no ano de 1997. Este foi o primeiro tratado internacional para controle da emissão de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera. As metas estabelecidas pelo acordo determinavam a redução de 5,2% de lançamento dos gases em relação aos níveis emitidos no ano de 1990 e teve como prazo para o cumprimento da meta o período de 2008 a 2012.

O setor rodoviário tem desenvolvido novas tecnologias no âmbito da pavimentação para se adequar à diminuição da emissão de gases de efeito estufa (GEE). Segundo Motta (2011) a diminuição das temperaturas de mistura e compactação com as misturas mornas e semimornas pode trazer importantes benefícios relacionados ao meio ambiente, à exposição ocupacional e à qualidade da pavimentação. Assim, dada a natureza do CAP, misturas asfálticas usinadas a quente são fabricadas e compactadas a temperaturas superiores a 150°C. No entanto, trabalhar com a mistura à temperaturas tão elevadas produz emissões de

gases de efeito estufa, bem como substâncias químicas poluentes que afetam a qualidade do ar.

Segundo D'Angelo *et al* (2008) e Capitão *et al* (2012) nas misturas mornas as emissões de gases são significativamente reduzidas. Estas podem reduzir de 30% a 40% de dióxido de carbono (CO₂) e dióxido de enxofre (SO₂), 50% para os compostos orgânicos voláteis, 10% a 30% de monóxido de carbono (CO), 60% a 70% para óxidos nitrosos (NO_x) e 20% a 25% para poeiras.

No Brasil, o Decreto nº 6.263, de 21 de novembro de 2007, instituiu o Plano Nacional sobre Mudança do Clima, onde estabelece que a mudança do clima é o resultado de um processo de acúmulo de gases de efeito estufa na atmosfera, que está em curso desde a revolução industrial. Os países apresentam diferentes responsabilidades históricas pelo fenômeno, segundo volumes de suas emissões antrópicas.

A Política Nacional sobre a Mudança do Clima (PNMC), instituída pela Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009, tem como uma das diretrizes, a promoção e o desenvolvimento de pesquisas científico-tecnológicas, e a difusão de tecnologias, processos e práticas orientadas.

O setor rodoviário tem procurado seguir esta mesma tendência, desenvolvendo novas tecnologias no âmbito da pavimentação com o objetivo de contribuir com as questões ambientais (MOTTA, 2011).

A produção mais limpa, sem a emissão de fumos prejudiciais à saúde humana e, ao meio ambiente, ocorre com a diminuição da temperatura de fabricação da mistura asfáltica, sem, contudo, diminuir a qualidade e eficiência da pavimentação. Neste princípio é que, atualmente, se desenvolvem no Brasil e no mundo, diversas pesquisas tais como: Motta (2011), Rubio *et al* (2012), Wen *et al* (2013) e Lucena *et al* (2016), na possibilidade de emprego de materiais alternativos para a confecção de misturas mornas e semi-mornas.

Os trabalhadores envolvidos nas etapas de fabricação, transporte e lançamento da mistura asfáltica estão propensos a problemas de saúde, dado a exposição constante a voláteis, constituintes do CAP. Segundo Kristjansdottir (2006) a produção de misturas asfálticas mornas reduz significativamente emissões, fumaça e odor em comparação com uma produção regular de misturas asfálticas quente. Emissões na produção de asfalto e compactação pode, em certos níveis elevados, serem prejudiciais à saúde. Em 1977, o Instituto Nacional para a

Segurança e Saúde Ocupacional (NIOSH) determinou os efeitos adversos que essas emissões acarretam à saúde como: irritação das membranas mucosas da conjuntiva e do trato respiratório. A entidade também reconheceu, em evidências a partir de estudos em animais, indicativos de que o CAP deixado sobre a pele, durante longos períodos de tempo, pode resultar em carcinomas locais. No ano de 2000, o NIOSH publicou uma revisão do perigo nos efeitos sanitários da exposição ocupacional ao asfalto. Nesta revisão, NIOSH avaliou os efeitos potenciais para a saúde da exposição ocupacional ao asfalto.

O CAP é utilizado sempre em temperaturas altas, portanto durante o transporte, estocagem e processamento, é necessário o emprego de equipamentos especiais de proteção individual para manuseio. As emissões de vapores visíveis e fumaças começam a ser percebidas a temperatura em torno de 150°C e são compostas de hidrocarbonetos e pequena quantidade de H₂S (Sulfeto de Hidrogênio). Essa quantidade de H₂S pode acumular-se em ambientes fechados, tais como tanque de estocagem, e pode ser letal caso não haja ventilação adequada. Estes também pode conter pequena quantidade de compostos aromáticos policíclicos (BERNUCCI *et al*, 2010).

2.4 Misturas Asfálticas Mornas

O CAP é uma combinação complexa de hidrocarbonetos, composto em sua maioria por hidrocarbonetos alifáticos, alicíclicos e aromáticos. Este também pode conter quantidades pequenas de nitrogênios, oxigênios, compostos de enxofre e metais, principalmente níquel e vanádio (OTTO, 2009).

As misturas asfálticas mornas tem uma diminuição da temperatura em torno de 30°C a 50°C, em relação às tradicionais misturas usinadas à quente. Seguindo esta mesma tendência, foi desenvolvido na França um outro tipo de tecnologia onde a redução de temperatura é ainda maior, da ordem de 50°C ou mais, com as misturas sendo preparadas e aplicadas abaixo de 100°C. Neste caso, têm-se as chamadas misturas asfálticas semimornas (em inglês, *Half-Warm Mixes Asphalt* – HWMA) (MOTTA, 2011).

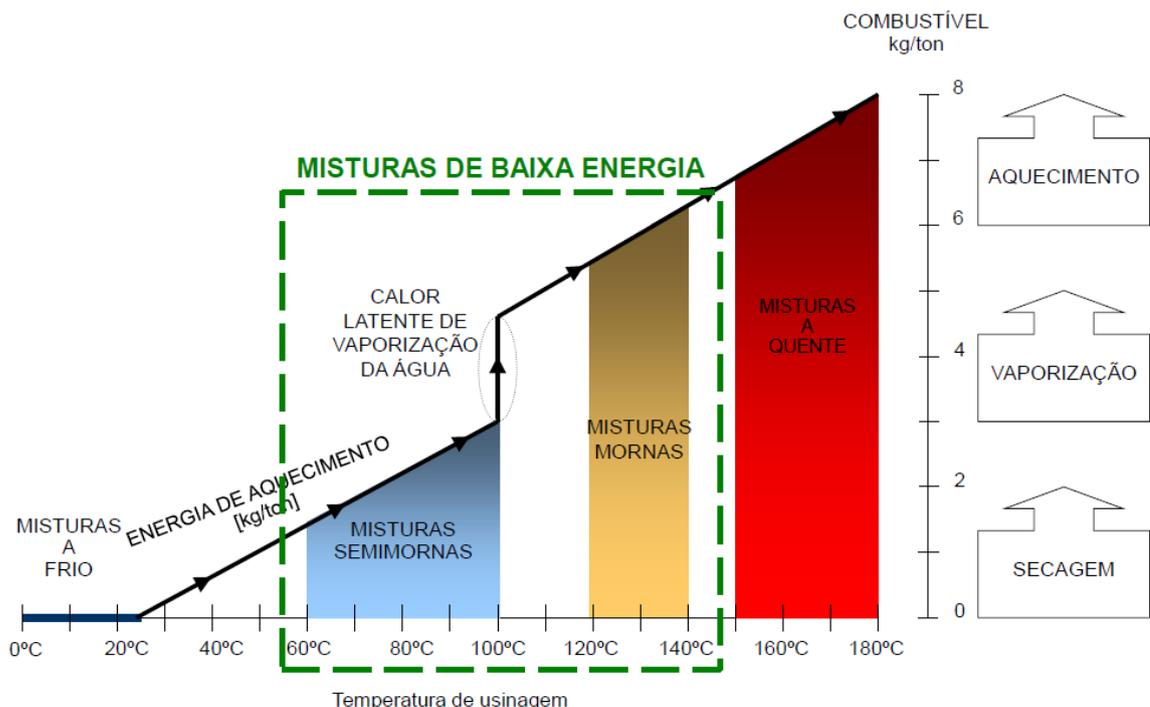
Portanto, as misturas podem ser classificadas quanto a temperatura em: misturas quentes (HMA) (temperatura entre 150°C e 190°C); misturas mornas (WMA) (temperaturas entre 100° a 140°C); misturas semimornas (HWMA)

(temperaturas entre 60°C e 100°C) e misturas frias (temperatura ambiente). (RUBIO, 2011).

Segundo D'Angelo *et al* (2008) em temperaturas abaixo de 80°C praticamente não ocorrem emissões de gases tóxicos, enquanto que em cerca de 150°C as emissões são apenas cerca de 1mg/h. As emissões mais significativas ocorrem em temperaturas acima de 180°C.

Na Figura 2.1 observa-se os tipos de misturas asfálticas, classificadas de acordo com a temperatura de usinagem e quantidade de combustível, utilizadas no processo de produção. As misturas semimornas e mornas são consideradas misturas de baixa energia, no entanto no processo de secagem e vaporização da água ainda demandam grande quantidade energética para serem executados. Verifica-se na Figura 2.1 o alto consumo de combustível na usinagem da mistura a quente, dada a necessidade da secagem dos agregados pétreos, manutenção da temperatura e redução da viscosidade do asfalto.

Figura 2.1 - Classificação por faixa de temperatura (D'angelo, 2008a – Adaptado CCR Nova Dutra)



Nos dias atuais há uma preocupação mundial com a poluição e as possibilidades de diminuição da carga poluente. Neste contexto, estudos são realizados para a utilização de produtos de origem vegetal, com o intuito de

amenizar a emissão de poluentes na atmosfera, tornando os processos menos tóxicos, principalmente aqueles associados aos derivados de petróleo.

Assim, após o ano de 1997, quando foi firmado o protocolo de Quioto, alguns países começaram a desenvolver os primeiros pavimentos com misturas asfálticas mornas. Na Europa, a Alemanha e a Noruega foram os países pioneiros na pesquisa e execução de pavimentos, a partir de 1995, utilizando diferentes tecnologias e, posteriormente, o tema foi introduzido nos Estados Unidos em 2002 (MOTTA, 2011).

A diminuição da temperatura na produção de misturas asfálticas é desejável sob diversos aspectos. As reduções das emissões de gases poluentes e do consumo de energia são importantes na motivação ambiental.

Budny (2012) elenca algumas vantagens na utilização de misturas asfálticas mornas, quando comparadas à mistura asfáltica quente:

- redução do envelhecimento do CAP por oxidação, preservando a resposta elástica, o que retarda o processo do fissuramento dos revestimentos asfálticos;
- melhoria da trabalhabilidade da mistura asfáltica e facilidade/otimização da compactação;
- redução do consumo de combustível da usina em até 30%;
- diminuição significativa da emissão de gases, melhorando a qualidade do ar durante a produção da mistura asfáltica;
- redução da exposição dos trabalhadores aos fumos (fumaça causada devido à alta temperatura da mistura) e odores tanto na usina como na aplicação;
- possibilidade de aplicação em climas mais frios;
- aumento da distância de transporte de massa asfáltica, além da possibilidade da execução de remendos e aplicação de camadas mais delgadas com melhor qualidade, devido ao menor potencial de resfriamento;
- abertura ao tráfego mais rápida sobre a mistura asfáltica recém compactada;

- possibilidade de utilização de um volume maior de material de fresagem quando se usa em reciclagem.

Tecnologias de misturas asfálticas mornas tem o potencial para serem benéficas durante a pavimentação à frio ou quando as misturas devem ser transportadas por longas distâncias antes da colocação. Quanto menor o diferencial entre a temperatura de usinagem e a temperatura ambiente, menor a taxa de arrefecimento.

A mistura asfáltica morna pode ser compactada a temperaturas mais baixas, tendo mais tempo disponível para a compactação (D'ANGELO *et al*, 2008a).

Ainda segundo Budny (2012), ressalta-se que não se deve generalizar os benefícios destas tecnologias, visto que existem diversos produtos no mercado e que cada produto possui composição diferente e em consequência o seu desempenho será diferente. Dentre as desvantagens/cuidados provenientes do uso de misturas mornas, destacam-se:

- pode ocorrer trincamento precoce devido à presença de umidade residual na interface ligante-agregado. Como consequência da aplicação de temperaturas de usinagem e compactação reduzidas, pode ocorrer de esta umidade não ser totalmente expulsa da mistura, o que prejudica o potencial adesivo do ligante sobre a superfície dos agregados;

- dados insuficientes para validar ou rejeitar algumas das técnicas ou produtos que vêm sendo testados, uma vez que as pistas com essas técnicas são ainda bem recentes;

- incógnitas sobre a real redução de custos. É necessário verificar se o consumo reduzido de energia é suficiente para diminuir os custos globais de produção;

- alguns aditivos que fazem uso de ceras em sua composição não apresentam um comportamento satisfatório a temperaturas atmosféricas muito baixas. Isto é explicado pela cristalização das ceras, que tendem a aumentar a viscosidade e a rigidez do ligante;

2.4.1 Processo de produção de Misturas Asfálticas Mornas

Atualmente, a produção de misturas asfálticas mornas é possível a partir de: (i) espumejo do asfalto, e/ou (ii) introdução de aditivos orgânicos ou de aditivos surfactantes, diretamente no ligante ou durante o processo de mistura. Geralmente, de forma combinada a estes elementos, procede-se à diminuição da temperatura dos agregados para que a usinagem ocorra em temperatura reduzida, visto que o material pétreo compõe a maior parte de uma mistura asfáltica (cerca de 95%) e isto já seria suficiente para baixar a temperatura de usinagem de maneira significativa. Entretanto, a diminuição da temperatura do ligante também se faz interessante, visto que isto pode contribuir para o menor envelhecimento/enrijecimento do asfalto (MOTTA, 2011).

A redução da temperatura alcançada pela mistura asfáltica morna advém do uso de várias tecnologias que têm sido desenvolvidas nos últimos anos, e que podem ser classificadas em três grupos: aditivos orgânicos, aditivos químicos, e os processos de formação de espuma que contém água ou à base de água. Embora todos eles apresentem o mesmo objetivo, o processo de fabricação é diferente (RUBIO, 2011).

Segundo Motta (2011) os aditivos orgânicos podem ser introduzidos previamente no ligante, ou juntamente com este durante a usinagem, possibilitando redução da temperatura de mistura em cerca de 30°C a 40°C. Com o resfriamento da mistura asfáltica, estes elementos se cristalizam de modo disperso no ligante, aumentando a rigidez deste asfalto e, por consequência, da mistura como um todo.

Pesquisas tem sido realizadas em diversos países Asli *et al* (2012), Zargar *et al* (2012), Su *et al* (2014), Chen *et al* (2014) e Maharaj *et al* (2015), quanto ao emprego de óleo vegetal, mais especificamente, óleo de cozinha residual, no rejuvenescimento do RAP(Asfalto reciclado). Em outras pesquisas também estão sendo levantadas possibilidades de emprego do bioasfalto com o emprego de óleo de cozinha residual (Wen *et al* 2013). As misturas estão sendo desenvolvidas em pequena escala, sendo realizadas com a adição do óleo de cozinha em misturadores de hélice a 350 rpm a 130°C (ASLI *et al*, 2012).

Segundo Rubio *et al* (2011) outro tipo de tecnologia de mistura asfáltica morna utiliza aditivos químicos. Estes produtos não dependem de formação de espuma ou a redução de viscosidade para redução de mistura e temperatura de compactação.

Em vez disso, eles incluem geralmente uma combinação de agentes de emulsificação, agentes tensioativos, polímeros e aditivos para melhorar o recobrimento, trabalhabilidade, e compactação, bem como agentes promotores de adesão. A qualidade de aditivos necessários e a redução da temperatura conseguida por esta tecnologia depende do produto utilizado. Os aditivos são misturados com CAP antes da dosadora de CAP e/ou misturados de asfalto. Apesar de aditivos químicos serem mais frequentes nos EUA, eles também têm sido utilizados em países europeus como França e Noruega. Uma vez que estes produtos de misturas asfálticas mornas são muito recentes, eles devem ser estudados com maior profundidade. No entanto, os resultados obtidos indicam a diminuição da temperatura e viabilidade do uso destes.

O processo de formação de espuma ocorre por meio da introdução de pequenas quantidades de água no asfalto quente, seja por meio de um injetor de formação de espuma ou um material hidrófilo, tais como zeolita, ou agregado úmido. Segundo D'Angelo *et al* (2008a) quando um dado volume de água se transforma em vapor à pressão atmosférica, expande-se por um fator 1,673. Quando a água é dispersa no asfalto quente e se transforma em vapor (de contato com o asfalto quente), resulta em uma expansão da fase de aglutinante e redução da viscosidade da mistura. A quantidade de expansão depende de uma série de fatores, incluindo a quantidade de água adicionada e a temperatura do ligante.

2.4.2 *Experiência Brasileira em Misturas Asfálticas Mornas*

O Brasil tem desenvolvido pesquisas referentes a misturas mornas e misturas semimornas, desde o ano de 2007.

Otto (2009) realizou uma pesquisa sobre o comportamento mecânico das misturas mornas com adição de zeólita clinoptilolita com teores de 4,5%, 5%, 5,5%, 6% e 6,5%. No ensaio de Fadiga foram analisados 28 corpos de prova por solicitações sinusoidais repetidas a 25 Hz e 10°C, a mistura asfáltica morna com adição de zeólita demonstrou menor suscetibilidade à variações pelo número de aplicação de solicitações e sua deformação foi inferior que a mistura controle. Nos resultados de Módulo Complexo, a mistura morna apesar de apresentar maior suscetibilidade térmica, teve maior valor absoluto referente a norma do módulo

complexo. No dimensionamento com ambas misturas, a mistura morna apresentou maior espessura, em torno de 25% superior à de controle.

Motta *et al* (2011) estudaram a utilização *in situ* de uma mistura asfáltica morna com aditivo surfactante. A mistura morna foi produzida com aditivo surfactante líquido Gemul XT14, em uma taxa de 0,3% (em relação à massa do asfalto), tendo sido obtido uma diminuição de 25°C, em relação à mistura asfáltica em temperatura convencional. Os ensaios laboratoriais indicaram que a mistura morna apresentou, no geral, comportamento semelhante ao da mistura a quente, em termos de habilidade de compactação, resistência à tração por compressão diametral, deformação permanente e dano por umidade induzida. A produção da mistura em usina e a execução, em pista, não indicaram dificuldades executivas adicionais e ocorreram de modo semelhante a uma mistura convencional.

Budny (2012) realizou uma pesquisa onde o CAP das misturas foi modificado pelos aditivos CCBIT 113AD e AD-WARM. Para avaliar a incorporação dos aditivos ao CAP foram dosadas misturas asfálticas com 2% de CCBIT 113AD e 0,3% de AD-WARM, e produzidos corpos-de-prova para a realização dos ensaios de caracterização volumétrica e para os ensaios mecânicos: módulo de resiliência, resistência a tração, fadiga, *flow number* e adesividade. Os resultados experimentais das misturas mornas, avaliadas neste estudo, foram comparados com os resultados obtidos para misturas convencionais e indicaram que tais misturas podem ser usadas como alternativas às misturas asfálticas convencionais. O aditivo CCBIT 113AD, na proporção de 2%, permitiu diminuir a temperatura de compactação em 35°C e o aditivo AD-WARM, adicionado na proporção de 0,3% permitiu reduzir a temperatura de compactação em 15°C.

Souza (2012) realizou uma pesquisa onde foi adicionado ao CAP 50/70, teores de 2%, 3%, 4%, 5%, 6%, 7%, 8%, 9% e 10% de óleo de mamona. O autor realizou os ensaios de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade rotacional, onde foi verificado que a adição de óleo de mamona nas misturas até o teor de 5% apresentou valores destes parâmetros compatíveis com os obtidos para CAP puro e com SBS. A adição do óleo acarretou diminuição das temperaturas de usinagem, de agregados e de compactação em média de oito graus centígrados (8°C). Os resultados indicaram que o óleo de mamona pode ser utilizado como aditivo verde, promovendo um menor impacto sobre o meio ambiente e uma diminuição dos custos de nove por cento (9%) em relação a mistura convencional.

Sales (2015) avaliou o efeito da incorporação do aditivo CCBIT em misturas asfálticas a partir da caracterização, física e mecânica desta. A autora estudou três concentrações do aditivo (2,0%, 2,5% e 3,0%) e analisou o comportamento mecânico das misturas por meio dos ensaios de Resistência à Tração, Módulo de Resiliência e Lottman Modificado. A partir dos resultados verificou-se que as misturas asfálticas com uso do CAP+CCBIT-113AD possuem a vantagem de reduzir as temperaturas de usinagem e compactação em até 10,8°C, com 3% de CCBIT, sem prejuízo ao comportamento mecânico, indicando que tais misturas podem ser usadas como alternativas a misturas asfálticas convencionais.

Lucena *et al* (2016) pesquisou a mudança das propriedades de consistência e a variação das temperaturas de usinagem e compactação com a adição ao CAP de teores de 0%, 0,5%, 1%, 1,5%, 2%, 2,5% e 3% de óleo de moringa. Os ligantes foram analisados por meio dos ensaios de viscosidade rotacional, Penetração, Ponto de Amolecimento e o envelhecimento à curto prazo RTFO. Os resultados mostraram que a adição do óleo de Moringa Oleífera Lam deve ser efetuada para teores no intervalo compreendido entre 0,5% a 1%, pois nestes teores ocorre uma diminuição significativa das temperaturas de usinagem e compactação ($\approx 5^\circ\text{C}$), sem comprometer o desempenho do CAP.

2.5 Óleo de Soja e Óleo de Milho

2.5.1 Produção e características gerais

A produção nacional de grãos é uma das maiores do mundo, com destaque para a produção de soja e de milho. Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), por meio do relatório de acompanhamento da safra brasileira de grãos (janeiro/2016), o Brasil tem uma estimativa de produção de 210,5 milhões de toneladas na safra 2015/2016.

Segundo o United States Department of Agriculture (USDA/2016), o Brasil é responsável por 27% da produção mundial de soja. Na Tabela 2.1, observa-se que o Brasil é o 2º maior produtor e exportador mundial de soja em grão, farelo e óleo de soja e o 4º maior consumidor. O milho (Tabela 2.2) ocupa a terceira posição em produção mundial e o 4º em consumo.

Tabela 2.1 - Safra Mundial de Soja 2015/2016 – 12º Levantamento do USDA – Abril/16

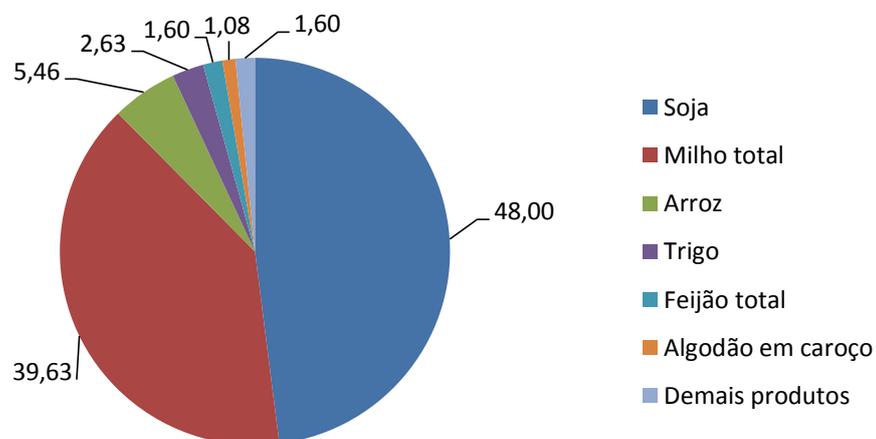
Produção Mundial (milhões de t) - SOJA			Consumo Mundial (milhões de t) - SOJA		
Países	Safras		Países	Safras	
	14/15	15/16		14/15	15/16
EUA	106,9	106,9	China	87,2	95,3
Brasil	97,2	100,0	EUA	54,9	54,4
Argentina	61,4	59,0	Argentina	44,4	50,1
China	12,2	11,8	Brasil	43,4	43,0
Demais	41,9	42,4	Demais	69,8	73,6
Mundo	319,5	320,2	Mundo	300,5	316,3

Tabela 2.2 - Safra Mundial de Milho 2015/2016 – 12º Levantamento do USDA – Abril/16

Produção Mundial (milhões de t) - MILHO			Consumo Mundial (milhões de t) - MILHO		
Países	Safras		Países	Safras	
	14/15	15/16		14/15	15/16
EUA	361,1	345,5	EUA	301,9	301,5
China	215,6	224,6	China	202,0	218,0
Brasil	85,0	84,0	U.E.28	77,6	74,0
U.E.28	75,5	57,5	Brasil	57,0	58,0
Demais	275,6	260,6	Demais	323,6	319,3
Mundo	1.012,8	972,1	Mundo	962,1	970,8

No Brasil a soja ocupa o primeiro lugar em produção, com aproximadamente 100,9 milhões de toneladas, correspondendo a 48% da produção nacional de grãos (Figura 2.2). Em segundo lugar o milho, com 39,63%, corresponde a uma produção de 83,3 milhões de toneladas (CONAB/2016).

Figura 2.2 - Brasil - Percentagem da produção total por produto, fonte CONAB 2016



Diante do alto consumo óleo vegetal em geral, surge a necessidade de pesquisar alternativas para o reaproveitamento deste, a fim de evitar o descarte

inadequado do óleo residual como no solo, rios e tubulações de esgoto. Uma aplicação ecologicamente correta poderia ser a adição deste, em pequena percentagem, em substituição parcial ao CAP utilizado na pavimentação.

Segundo IAL (2008) as determinações feitas na análise de óleos e gorduras são geralmente as dos chamados índices, que são expressões de suas propriedades físicas e químicas dos mesmos e não as porcentagens dos seus constituintes. Assim, são determinados os índices de iodo, saponificação, peróxidos e as constantes físicas como o ponto de fusão e o índice de refração. Estes índices, juntamente com as reações características, servem para identificação e avaliação da maioria dos óleos e gorduras, sendo o resultado da análise baseado neste conjunto de dados.

a) índice de refração: é a relação existente entre a velocidade da luz no ar e no meio. Ele varia na razão inversa da temperatura e tende a aumentar com o grau de instauração dos ácidos graxos constituintes dos triglicerídeos. É característico para cada tipo de óleo. Está relacionado com o grau de saturação das ligações, mas é afetado por outros fatores tais como: teor de ácidos graxos livres, oxidação e tratamentos térmicos (ALMEIDA *et al*, 2011).

b) índice de iodo: é a medida do grau de instauração de um óleo ou de uma gordura, ou seja, relaciona-se com a quantidade de duplas ligações presentes na amostra. A redução observada neste índice se deve à quebra de duplas ligações resultantes de reações de polimerização, ciclização e oxidação, sempre associada com um aumento do ponto de fusão e consistência da amostra (FUENTES, 2011).

c) acidez: revela o estado de conservação do óleo, visto que a decomposição dos glicerídeos é acelerada pelo aquecimento e pela luz, a rancidez é quase sempre acompanhada pela formação de ácidos graxos livre (FUENTES, 2011).

d) índice de peróxido: é um método clássico e sensível na determinação de hidroperóxidos, produtos primários da oxidação. Os peróxidos são instáveis e formam componentes transitórios durante a oxidação (FUENTES, 2011).

e) viscosidade: é caracterizada pela resistência ao escoamento do fluido. É variável nos óleos vegetais e depende do grau de instauração e tamanho das cadeias graxas que os compõem. Podendo também ser influenciada pela presença de ramificações e posicionamento das insaturações (MELO, 2010)

A Tabela 2.3 apresenta a viscosidade dos óleos de milho e de soja em função da temperatura. O óleo de milho apresenta uma viscosidade maior que o óleo de soja, no entanto, com o aumento da temperatura, a diferença de viscosidade entre eles diminui, tornando a diferença pouco representativa.

Tabela 2.3 - Viscosidade dos óleos de milho e soja, em função da temperatura (Fonte: CANCIAM, 2010 - Adaptado)

T (°C)	Milho (10^{-3} Pa.s) H	Soja (10^{-3} Pa.s) η
20	67,6	59,0
30	47,4	41,2
40	32,3	29,5
50	24,8	22,3
60	18,5	16,7
70	14,0	12,6

2.5.2 Óleo de soja

A soja trata-se de um grão rico em proteínas, sendo consumido tanto por homens como por animais. Este grão tem formato arredondado, com cor amarela e contém de 18% a 20% de óleo e teor de proteína de 45% (Ageitec-EMBRAPA, 2016).

Essa leguminosa contém o maior teor de proteína e segundo maior teor de óleo dentre todos os cereais e sementes de leguminosas (REZENDE, 2012).

Nos últimos 20 anos, a agricultura de soja duplicou sua área de cultivo à alta demanda do setor produtivo e ao crescimento mundial no consumo deste grão por humanos e por animais. A cultura também tem tido aplicabilidade na produção de biocombustíveis (Ageitec-EMBRAPA, 2016).

O óleo de soja pode ser obtido por três métodos de extração: prensagem mecânica, solvente e enzimática. No primeiro método são utilizadas prensas contínuas para retirar o óleo do grão, separando-o da torta. Na extração com solvente, os grãos são triturados para facilitar a penetração em seu interior do solvente (hexano – derivado do petróleo). Por fim, na extração enzimática, a matéria-prima é fermentada por enzimas com posterior extração de óleo (Ageitec-EMBRAPA/2016).

2.5.3 Óleo de milho

O milho é um cereal rico em amido e proteínas, originário das Américas e cultivado há pelo menos cinco mil anos. Espalhou-se pelo mundo após o descobrimento das Américas. A maior utilização do milho é para alimentação animal, consumindo cerca de 70% da produção mundial.

Este cereal não é cultivado por seu conteúdo em óleo, o qual representa somente 3,1-5,7% do peso do grão, embora existam variedades com um teor mais elevado. Porém, ele é cultivado pelo teor de amido e proteína (61-78% e 6-12% respectivamente). O germe (embrião), que representa 9% do grão, contém cerca de 83% do total de lipídios. O restante encontra-se assim distribuído: no endosperma 15%, farelo 1,3%, e extremidade 0,7% (ABOISSA, 2016).

A qualidade física e química dos grãos é determinada pelo seu destino ou uso final. Existem, hoje, no mercado, milhos com alto teor de óleo (6 a 7,5%) (EMBRAPA, 2006).

O óleo de milho é conhecido pela sua excelente estabilidade oxidativa. Este fato deve-se aos altos níveis de antioxidantes naturais como tocoferóis e ácido ferrulico (ABOISSA/2016).

2.5.4 Utilização de óleo de cozinha em pavimentação

O óleo de cozinha residual, comparado com outros componentes de baixa viscosidade, tem o ponto de fulgor acima de 220°C, o que significa que o cozimento do óleo de cozinha residual tem uma elevada segurança para aplicação nas misturas asfálticas. Além disso, o óleo de cozinha residual passou pelo processo de cozedura em altas temperaturas, e conseqüentemente, quando aquecido novamente, não apresentará componentes voláteis como gases tóxicos (CHEN *et al* 2014).

Algumas pesquisas foram desenvolvidas com emprego de óleos vegetais (com a finalidade principal de reaproveitamento do óleo de cozinha residual) para produção de misturas asfálticas semimornas e mornas, bem como o rejuvenescimento do asfalto envelhecido.

Wen *et al* (2013) desenvolveram um estudo sobre a utilização do bioasfalto como uma possível alternativa ao asfalto convencional. O bioasfalto foi produzido a partir de resíduos de óleo de cozinha e depois submetido a processo termoquímico.

O bioasfalto foi misturado com CAP em diferentes percentuais (0, 10, 30 e 60%), por peso do CAP referência. Os resultados dos testes, com base na carga de cisalhamento constante e testes múltiplos de ensaio de fluência e de recuperação, mostraram que a adição de bioasfalto diminuiu a resistência a fadiga e deformação permanente. O teste de desempenho da mistura HMA indicou que a adição de bioasfalto reduziu a rigidez da mistura (módulo dinâmico) e a sua resistência à fissuração por fadiga, mas aumentou a resistência ao craqueamento térmico. O teste mostra que a suscetibilidade à presença de água, passou no requisito mínimo da razão de resistência à tração.

Asli *et al* (2012) estudaram a utilização de óleo de cozinha residual (OMA) para rejuvenescer o CAP. Os autores estudaram o CAP original, CAP envelhecido e CAP rejuvenescido com óleo, por meio de ensaios convencionais: ponto de amolecimento, penetração e viscosidade Rotacional. Adicionou-se para cada grupo de CAP, 1%, 2%, 3%, 4% e 5% de óleo de cozinha residual. Os valores de penetração aumentaram linearmente com o aumento do teor de OMA utilizado. O ponto de amolecimento e a viscosidade diminuíram com a adição de OMA. A pesquisa mostrou o potencial do óleo de cozinha residual para a reciclagem do CAP. Esta solução diminuiria os custos de manutenção do pavimento, já que não houve diferença significativa entre o CAP original e o CAP rejuvenescido.

Zargar *et al* (2012) estudaram a utilização de óleo de cozinha residual (OMA), com a finalidade de rejuvenescimento do CAP envelhecido. As propriedades físicas e químicas do CAP original, CAP envelhecido e CAP rejuvenescido, foram medidas e comparadas pelos ensaios de ponto de amolecimento, penetração, viscosidade Rotacional, reômetro de cisalhamento dinâmico e espectroscopia de infravermelho. Os testes foram realizados com os teores de 1%, 2%, 3%, 4% e 5% de OMA, por peso de CAP. O autor verificou que à medida que a temperatura aumentou de 30°C para 80°C, o módulo de cisalhamento complexo diminuiu progressivamente. O CAP envelhecido possui um ângulo de fase inferior ao CAP virgem. Na pesquisa foi verificado que a aplicação de OMA como um rejuvenescedor para CAP envelhecido irá introduzir uma solução ambiental e econômica para a reutilização deste resíduo.

Portanto, observa-se que a preocupação com a destinação adequada dos resíduos dos óleos vegetais tem sido evidenciada com pesquisas que possam apontar emprego adequado destes resíduos.

2.6 Considerações Finais

O acordo firmado por diversos países no protocolo de Quioto, fez com que a engenharia de pavimentação procurasse novos materiais para emprego junto ao CAP para a diminuição dos gases do efeito estufa. No Brasil a Política Nacional de Mudança do clima (PNMC) e a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) têm direcionado pesquisas para o reaproveitamento de resíduos prejudiciais ao meio ambiente.

A literatura é farta em pesquisas onde óleos vegetais são empregados no rejuvenescimento do asfalto envelhecido, na diminuição de viscosidade do CAP novo e principalmente na diminuição de temperatura. Esta diminuição da temperatura de usinagem e compactação reduz a emissão de gases e contribuem para a saúde do trabalhador.

A utilização de materiais alternativos, em especial o óleo de cozinha residual, pode vir a possibilitar a confecção de misturas asfálticas mornas e contribuir para a redução de agressões ao meio ambiente com descartes irregulares de óleos.

A grande produção brasileira de grãos de soja e milho, primeiro e segundo lugares, respectivamente, faz com que estes óleos tenham potencial para serem utilizados neste tipo de mistura.

CAPÍTULO 3

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais e os equipamentos utilizados na pesquisa, bem como a metodologia empregada para a realização dos ensaios laboratoriais.

Os ensaios de caracterização e reologia do CAP, foram realizados no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP), do Departamento de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). A caracterização dos óleos de soja e de milho foi realizada no Laboratório de Química Orgânica, do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Os ensaios de FTIR dos óleos de soja e de milho foram realizados no LDCMat/DEQ da Universidade Federal de Sergipe (UFS).

3.1 Materiais

3.1.1 *Ligantes asfálticos*

Na pesquisa foi utilizado CAP 50/70, obtido pelo processo de destilação do petróleo pela refinaria Duque de Caxias (REDUC), pertencente a Petrobras S/A, e distribuído, pela empresa Brasquímica Produtos Asfálticos Ltda, localizada no município de Candeias-BA. Além deste, foi utilizado o Asfalto Modificado por Polímero (AMP) 55/75, modificado com polímero elastoméricos de SBS (estireno-butadieno-estireno), foi produzido pela empresa Stratura Asfaltos S/A, localizada no município de Maracanaú-CE.

3.1.2 *Óleo de Soja e de Milho*

Os óleos de soja e de milho (novos) foram adquiridos no comércio da cidade de Campina Grande-PB, ambos da marca “Liza”, tendo as informações nutricionais constantes na embalagem e apresentadas na Tabela 3.1, para uma porção de 13 ml.

Tabela 3.1 - Informações nutricionais do óleo de milho e óleo de soja

Quantidade por porção	Óleo de Milho	Óleo de Soja
Valor energético	108 kcal = 454 kJ	108 kcal = 454 kJ
Carboidratos	0 g	0 g
Proteínas	0 g	0 g
Gorduras totais	12 g, das quais:	12 g, das quais:
Gorduras saturadas	1,8 g	2,0 g
Gorduras trans	Não contém	Não contém
Gorduras monoinsaturadas	4,3 g	2,9 g
Gorduras poli-insaturadas	5,9 g	7,1 g
Ômega 6 (Ácido Linolêico)	5,7 g	-
Colesterol	0 mg	0 mg
Fibra alimentar	0 g	0 g
Sódio	0 mg	0 mg
Vitamina E	2,0 mg	1,7 mg

Para a obtenção dos óleos residuais (soja e milho) houve a doação de três litros de cada tipo por seis pontos comerciais que trabalham com frituras diversas. Após uma semana de utilização, estes mesmos óleos foram recolhidos e empregados na pesquisa. Em laboratório foi realizado a decantação e posteriormente filtragem com utilização de filtro de papel.

3.2 Métodos

As Figuras 3.1 e 3.2 apresentam as etapas dos trabalhos desenvolvidos nesta pesquisa.

Na primeira etapa (Figura 3.1) foram realizados os ensaios de caracterização físico-química dos óleos de soja e de milho, novos e residuais.

Na segunda etapa (Figura 3.2), foram realizados os ensaios de penetração, ponto de amolecimento, viscosidade rotacional, curva mestra, MSCR e PG para amostras do CAP 50/70 e AMP 55/75, sem adição de óleos, e após serem modificados com teores de 1%, 2% e 3% de óleo de soja e de milho, novo e residual. Estes teores foram definidos tendo em vista a literatura apresentar pesquisas (Asli et al, 2011, 2012; Zargar et al, 2012) onde utilizaram teores entre 1% a 5% de óleos residuais e os resultados obtidos foram satisfatórios com teor médio de 3%.

Figura 3.1 - Primeira Etapa - Caracterização físico-química dos óleos

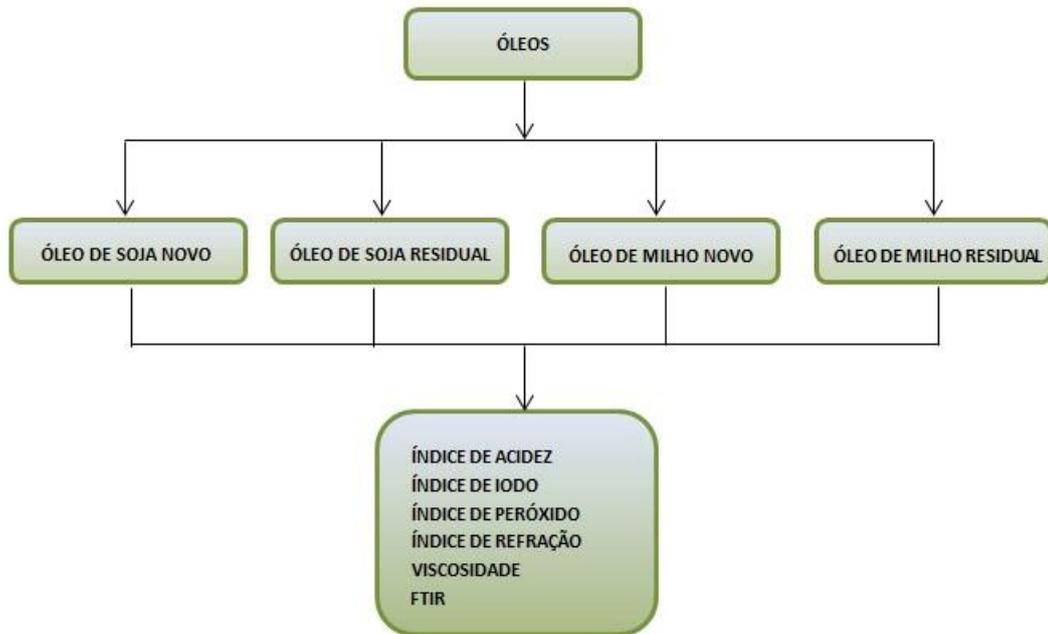
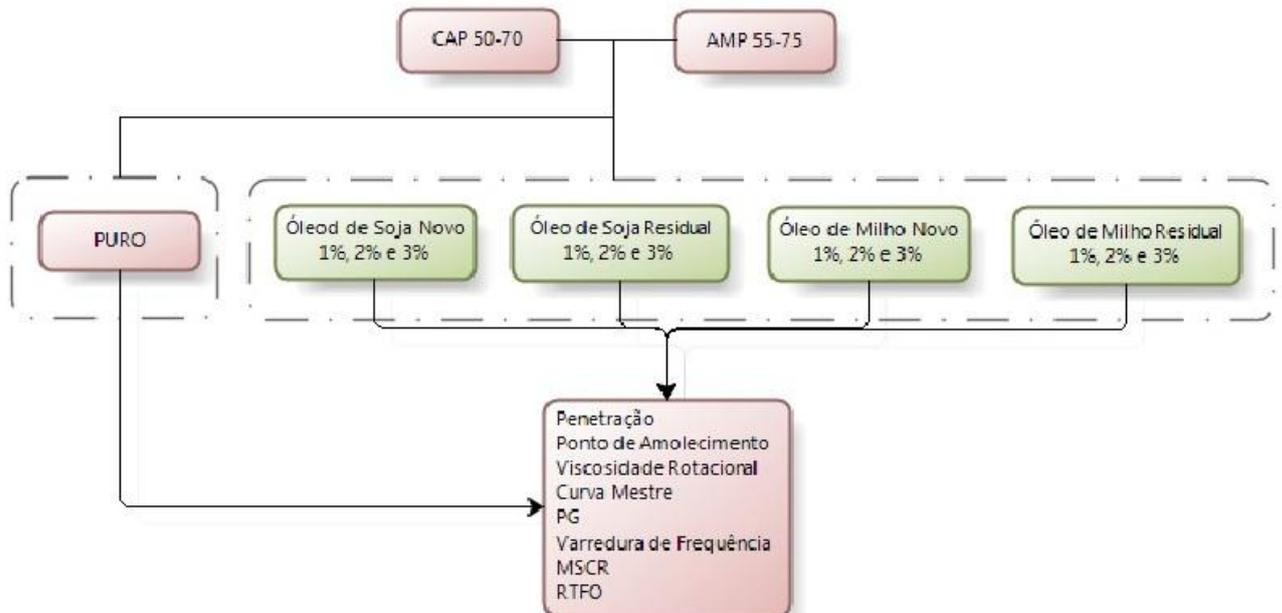


Figura 3.2 - Segunda Etapa – Caracterização física e reológica dos CAP Puros e Modificados



Na terceira etapa foi realizado o procedimento de envelhecimento a curto prazo, utilizando a estufa RTFO (*Rolling Thin Film Oven*).

Em seguida, foram realizados ensaios reológicos para a caracterização viscoelástica dos ligantes, tanto puros como modificados, antes e pós-envelhecimento, com diferentes teores de óleo de soja e óleo de milho, novos e residuais.

3.2.1 Caracterização dos óleos de soja e milho

A caracterização físico-química dos óleos de soja e de milho, novos e residuais, foi realizada no Laboratório de Química Orgânica, do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), onde foram verificados os índices da Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Caracterização do Óleo de Soja e Óleo de Milho

ÍNDICES	METODOLOGIA
Índice de Acidez	IAL (2008)
Índice de Iodo	
Índice de Peróxido	
Índice de Refração (26°C)	
Viscosidade (40°C)	NBR 15184

3.2.2 Espectroscopia de Absorção na Região do Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

Os ensaios de FTIR dos óleos de soja e de milho foram realizados no LDCMat/DEQ da Universidade Federal de Sergipe (UFS). Estas análises foram realizadas em 64 varreduras de espectro com resolução de 4 cm^{-1} . O equipamento utilizado foi um espectrômetro de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR – Nicolet iS10 da Thermo Scientific). Os espectros foram obtidos pela técnica de reflectância total atenuada.

O FTIR é uma técnica que visa a classificação dos compostos químicos orgânicos encontrados em várias substâncias orgânicas. A tecnologia baseia-se no princípio de que um feixe de luz infravermelha que é composta de múltiplos comprimentos de onda e, que os compostos químicos orgânicos específicos irão absorver apenas um intervalo de comprimento de onda. Isto permite que o

instrumento envie um feixe de luz infravermelha por meio de uma amostra montada sobre um substrato e, usando um detector do outro lado da amostra, leia os comprimentos de onda que passam livremente pela amostra. Esses resultados são calibrados com substâncias puras conhecidas. Os comprimentos de onda são absorvidos e correlacionados com laços orgânicos (grupos funcionais). Os resultados são fornecidos de forma qualitativa e quantitativa (DEDENE, 2011).

Segundo Mothé (2009) a radiação na região do infravermelho se refere à parte do espectro eletromagnético de comprimento de onda maior que a região do visível e menor que a região das microondas. A região da radiação do infravermelho, entre 4000 e 600 cm^{-1} , é muito útil. A energia da radiação nessa região é absorvida pela molécula orgânica e convertida em vibração molecular. A configuração de energia de absorção obtida é chamada de espectro de infravermelho. Em sua forma usual, ele é um gráfico de intensidades (% de transmitância ou absorbância) versus comprimento de onda ou frequência de absorção. A unidade do comprimento de onda é o micrômetro (μ), igual a 10^{-3} mm. As frequências geralmente são expressas em termos de número de ondas, cuja unidade é o recíproco em (cm^{-1}).

As intensidades das bandas são expressas como transmitância (T) ou absorbância (A). Transmitância é a razão da força radiante transmitida por uma amostra pela força incidente na amostra. Absorbância é o logaritmo na base 10 do recíproco da transmitância, $A = \log_{10}(1/T)$.

3.2.3 *Preparação das misturas*

As misturas do CAP 50/70 e AMP 55/75, com o óleo de milho e óleo de soja, foram realizadas em um agitador mecânico de baixo cisalhamento, marca FISATOM modelo 722D (Figura 3.3). O procedimento de mistura foi executado segundo procedimentos descritos em Faxina (2006) e Souza (2012). Nestes, o CAP puro foi aquecido em estufa, a uma temperatura de 120°C e, em seguida, foi despejado 500g de CAP no agitador mecânico, onde foi aguardado a estabilização da temperatura em 135°C . Quando atingida a temperatura, teores de óleo de soja e milho, proporcionais ao peso do CAP puro (1%, 2% e 3%), foram adicionados ao CAP. A rotação utilizada foi pré-estabelecida em 406 rpm por um período de 20 minutos. Posteriormente, a mistura foi retirada, esfriada à temperatura ambiente e, acondicionada em recipiente fechado para utilização posterior.

Figura 3.3 - Agitador Mecânico, marca FISATOM, modelo 722D



3.2.4 Caracterização dos ligantes

- Ensaio de Penetração

O ensaio de Penetração foi realizado de acordo com a Norma DNIT 155/2010-ME. O equipamento utilizado foi um Penetrômetro Universal da marca Solotest, com divisões em 1/10mm. Para a realização deste ensaio foram utilizados de três recipientes metálicos e cilíndricos, com diâmetros de 55 mm, foi separada uma quantidade aproximada de 50 g. Após coberto para a proteção da amostra, foi deixado esfriar na atmosfera por um período de sessenta minutos. Posteriormente as amostras foram transferidas para o banho d'água a uma temperatura de 25°C, por sessenta minutos. Com a utilização do penetrômetro (Figura 3.4) foram realizadas três determinações em pontos da superfície da amostra, distante entre si e da borda, de aproximadamente 10 mm. A penetração encontrada foi a média das três perfurações de cada amostra de CAP 50/70 e AMP 55/75, puro e modificados, bem como antes e após o RTFO.

Figura 3.4 - Penetrômetro Solotest (Ensaio de Penetração)



A partir dos resultados do ensaio de penetração foi calculada a sensibilidade das misturas ao envelhecimento a curto prazo (RTFO) com o emprego da equação 3.1:

$$PEN\ retida = \frac{PEN\ final}{PEN\ inicial} \times 100 \quad (3.1)$$

Onde:

PEN final = penetração após o ensaio de RTFO

PEN inicial = penetração antes do ensaio de RTFO

- Ensaio de Ponto de Amolecimento

O ensaio de Ponto de Amolecimento (método anel e bola) foi realizado seguindo a Norma DNIT 131/2010-ME. Este ensaio fornece a temperatura na qual o asfalto amolece, quando aquecido sob certas condições particulares e atinge uma determinada condição de escoamento. O Ponto de Amolecimento deve ser a média das temperaturas indicadas pelo termômetro no instante em que a esfera de aço atinge a placa inferior (Figura 3.5). Este ensaio foi realizado com amostras de CAP 50/70 e AMP 55/75, puro e modificados, bem como antes e após o RTFO.

Figura 3.5 - Equipamento para ensaio de Ponto de Amolecimento



O Índice de Penetração ou Índice de Suscetibilidade Térmica foi calculado utilizando-se a equação 3.2, de acordo com o procedimento proposto por *Pfeiffer e Van Doormal*, para todas as misturas, com base nos resultados de penetração e do ponto de amolecimento. A suscetibilidade térmica indica a sensibilidade da consistência dos ligantes asfálticos à variação de temperatura.

$$ISC = \frac{(500)(\log PEN) + (20)(T^{\circ}C) - 1951}{120 - (50)(\log PEN) + (T^{\circ}C)} \quad (3.2)$$

Onde:

(T°C) = Ponto de amolecimento

PEN = Penetração a 25°C, 100g, 5 seg

- Ensaio de Viscosidade rotacional

O ensaio de viscosidade rotacional tem por finalidade medir a consistência dos ligantes e foi realizado segundo a metodologia descrita na ASTM D 4402/02. O método consiste na medição do torque necessário para rodar uma haste de prova (spindle) imersa em uma amostra de ligante aquecida sob velocidade constante. A quantidade de amostra utilizada no ensaio, depende do tamanho da haste de prova, que deve ser selecionada em função do ligante. No ensaio foi utilizado o viscosímetro rotacional cilíndrico modelo DV-III ULTRA e o modelo DV-II+ PRO,

cada um ligado a um controlador de temperatura individualizado (Figura 3.6), com a finalidade de obtenção da média dos valores entre os dois equipamentos. A viscosidade foi verificada em diferentes taxas de rotação, 20 rpm, 50 rpm e 100 rpm, à temperatura de 135°C, 150°C e 175°C, respectivamente. Neste ensaio foram utilizadas amostras de CAP 50/70 e AMP 55/75, puro e modificados, bem como antes e após o RTFO.

Figura 3.6 - Viscosímetro DV-III Ultra e DV-II+ Pro (Ensaio Viscosidade Rotacional)



- Procedimento de Envelhecimento a curto prazo (RTFO)

O procedimento adotado atualmente para a avaliação do envelhecimento a curto prazo utiliza a estufa de filme fino rotativa, RTFO (*Rolling Thin Film Oven*). Este envelhecimento é correlacionado com o envelhecimento do ligante que ocorre na usina e transporte até sua aplicação. As normas que descrevem os procedimentos e especificações deste ensaio são a ABNT NBR 15235/2009 e ASTM D2872-12 / 2013.

Os CAP's puros, e após a modificação com o óleo de soja e de milho, foram envelhecidos a curto prazo por meio de uma estufa de filme fino rotativo (RTFO), da marca MATEST, modelo B066 (Figura 3.7). Após o aquecimento do CAP em estufa, foi colocado aproximadamente 35 g da amostra nos frascos. Inicialmente, o frasco contendo a amostra foi pesado e posteriormente inserido na estufa. Após a estabilização da temperatura em 163°C, uma fina película de asfalto é continuamente girada dentro do recipiente por 85 minutos, com uma injeção de ar a

cada 3 a 4 segundos. Após a conclusão do ensaio, os frascos contendo o CAP foram novamente pesados e foi calculada a perda de massa.

Após o envelhecimento a curto prazo das amostras, as amostras foram novamente submetidas aos ensaios de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade Rotacional.

Figura 3.7 - Estufa Marca Matest (Envelhecimento a curto prazo RTFO)



A variação em massa das misturas, em percentagem, foi definida por meio da Equação 3.3.

$$M = \left(\frac{M_{inicial} - M_{final}}{M_{inicial}} \right) \times 100 \quad (3.3)$$

Onde:

M = variação em massa (%)

$M_{inicial}$ = massa do CAP antes do RTFO (g)

M_{final} = massa do CAP após o RTFO (g)

3.2.5 Reologia (DSR)

Os ensaios reológicos do CAP puro e modificado foram realizados utilizando o reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR), modelo Discovery (Figura 3.8) fabricado pela empresa TA Instruments. Os corpos de prova de aproximadamente 1 mm de

espessura e 25 mm de diâmetro foram preparados em moldes específicos de silicone. As amostras foram postas entre *spindles* de placas paralelas, com os mesmos diâmetros. Nestas análises foram verificados a Varredura de Frequência, PG (Grau de Desempenho) e MSCR.

Figura 3.8 - Reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR), modelo Discovery



O reômetro de cisalhamento dinâmico (*dynamical shear rheometer* – DSR) é utilizado na metodologia de dosagem SUPERPAVE para caracterização das propriedades viscoelásticas do CAP a temperaturas elevadas e intermediárias (BRINGEL, 2007).

Nesse equipamento é realizada a determinação de parâmetros reológicos tais como: módulo complexo (G^*) e ângulo de fase (δ). A amostra é colocada entre duas placas paralelas, das quais uma gira e a outra se mantém fixa, sendo submetida a ciclos de tensão ou deformação senoidais, dependendo do tipo de carregamento. Tanto G^* como δ são funções do tempo de carregamento e da temperatura. O ângulo de fase (δ) possibilita avaliar a razão entre a resposta elástica e a viscosa durante o processo de cisalhamento, enquanto o módulo complexo (G^*) indica a rigidez do material (Figura 3.9). O $|G^*|$ é definido como a razão entre a tensão máxima de cisalhamento e deformação máxima (Equação 3.4) (PAMPLONA, 2013).

$$|G^*| = \frac{\tau_{m\acute{a}x}}{\gamma_{m\acute{a}x}} \quad (3.4)$$

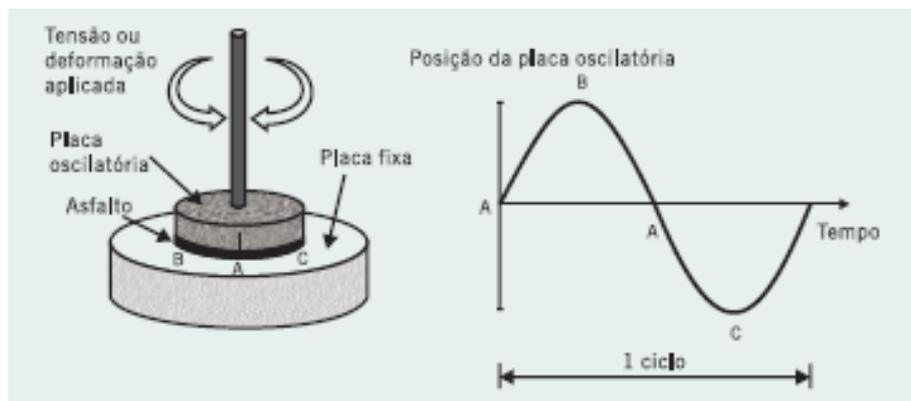
Onde:

$|G^*|$ = m3dulo din4mico de cisalhamento, Pa;

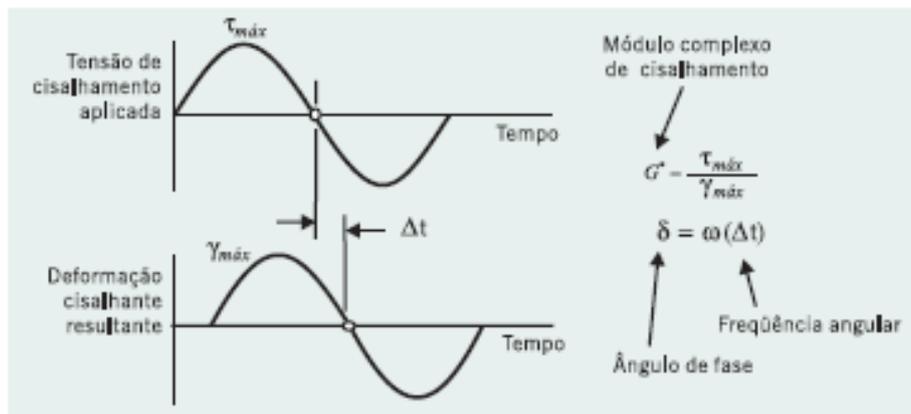
$\tau_{m\acute{a}x}$ = m3xima tens3o de cisalhamento aplicada, Pa;

$\gamma_{m\acute{a}x}$ = m3xima deforma3o devido 3 tens3o de cisalhamento aplicada;

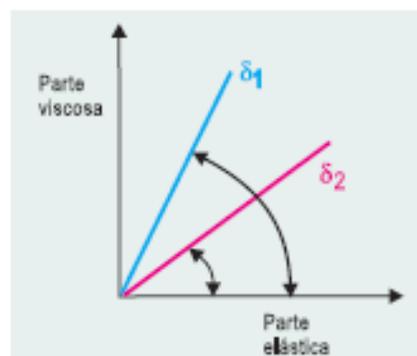
Figura 3.9 - Representa3o gr3fica do modo de aplica3o das tens3es ou deforma3es cisalhantes, dos par4metros e resultados obtidos com o DSR. (Fonte: Bernucci *et al*, 2007)



(a) Esquema de aplica3o da tens3o na amostra de asfalto



(b) Defasagem entre tens3o e deforma3o



(c) Exemplos de resultados do 3ngulo de fase de dois asfaltos diferentes

Segundo Bringel (2007) o δ é a medida do balanço viscoelástico do comportamento do material. Para materiais completamente elásticos não existe atraso entre a tensão cisalhante aplicada e a deformação cisalhante obtida, sendo δ igual a 0° . Para materiais totalmente viscosos, a deformação obtida está completamente defasada e vale 90° . Materiais viscoelásticos, tais como os ligantes asfálticos, possuem ângulo de fase variando entre 0° e 90° , dependendo da temperatura, sendo este uma combinação das respostas viscosas e elásticas. A altas temperaturas δ tende a 90° , e a baixas temperaturas δ tende a 0° .

O resultado do δ pode também ser registrado sob a forma da tangente do ângulo de perda ($\tan \delta$), também chamada de fricção interna ou amortecimento, que é a razão entre a energia dissipada (componente viscoso) e a energia potencial armazenada por ciclo (componente elástico), cuja definição matemática é apresentada na equação 3.5.

$$\tan \delta = \frac{G''}{G'} \quad (3.5)$$

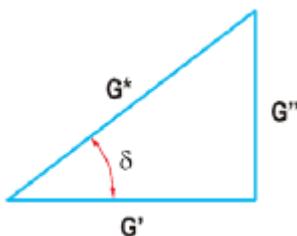
Onde:

G'' = componente viscoso;

G' = componente elástico;

Na Figura 3.10 observa-se a representação das relações de G^* , G' , G'' e δ . As relações dos parâmetros são verificadas nas equações 3.6 a 3.8.

Figura 3.10 - Representação das relações G^* , G' , G'' e δ (Fonte: Mothé, 2009)



$$G' = G^* \cos \delta \quad (3.6)$$

$$G'' = G^* \sin \delta \quad (3.7)$$

$$G^* = \sqrt{G'^2 + G''^2} \quad (3.8)$$

O componente em fase de G^* é denominado módulo de armazenamento (G'). O componente elástico indica a parcela de energia proveniente da tensão aplicada, temporariamente armazenada durante o teste, e que pode ser recuperada

posteriormente Corresponde à relação entre a tensão, quando tensão e deformação estão em fase, e a amplitude de deformação (equação 3.9) (FAXINA, 2006).

$$G' = \frac{\text{tensão quando } \delta = 0^\circ}{\text{amplitude de deformação}} = G^* \cos \delta \quad (3.9)$$

O componente fora de fase de G^* é denominado módulo de dissipação (G''). O componente viscoso (G'') indica a parcela de energia utilizada para dar início ao escoamento e que foi transferida de maneira irreversível em forma de calor. G'' representa a componente viscosa de G^* e é igual à tensão, quando $\delta = 0$, dividida pela deformação (equação 3.10) (FAXINA, 2006).

$$G'' = \frac{\text{tensão quando } \delta = 90^\circ}{\text{amplitude de deformação}} = G^* \sin \delta \quad (3.10)$$

Quando uma substância é puramente viscosa, seu ângulo de mudança de fase é 90° e, conseqüentemente, seu componente elástico é zero ($G' = 0$), e o módulo complexo é igual ao módulo de perda, $G^* = G''$. Por outro lado, se a substância é puramente elástica, seu ângulo de fase é 0° , o seu componente viscoso é zero ($G'' = 0$) e, conseqüentemente, o módulo complexo é igual ao módulo de armazenamento ($G^* = G'$) (BRINGEL, 2007).

As propriedades reológicas podem ser representadas tanto pela variação de G^* e δ como função da frequência, sob temperatura constante, comumente referidas como curvas-mestre, ou pela variação G^* e δ com a temperatura, em uma frequência selecionada ou tempo de carregamento selecionado, comumente chamadas de curvas isócronas. A Figura 3.11, mostra as propriedades reológicas típicas de um AC 40 e de um AC 5, sob uma faixa ampla de temperatura e frequências. A Figura 3.11, mostra as curvas-mestre, a 25°C , e Figura 3.12 mostra as curvas isócronas a 10 rad/s (1,59 Hz). Algumas características comuns do comportamento reológico dos ligantes asfálticos podem ser vistas nas Figuras 3.11 e 3.12 (FAXINA, original BAHIA e ANDERSON):

- Sob temperaturas baixas ou frequências altas, os dois ligantes asfálticos tendem a se aproximar de um valor limite de G^* de 1GPa e um valor limite para δ de 0° . Este valor de G^* reflete a rigidez das

cadeias de carbono e hidrogênio quando os ligantes asfálticos alcançam seu volume mínimo de equilíbrio termodinâmico. O valor limite de δ representa a natureza completamente elástica dos ligantes asfálticos a estas temperaturas;

- À medida que a temperatura aumenta ou a frequência diminui, G^* diminui continuamente, ao passo que δ aumenta continuamente. O primeiro reflete uma diminuição na resistência à deformação (amolecimento), ao passo que o segundo reflete uma diminuição na elasticidade ou habilidade em armazenar energia. A taxa de mudança é, no entanto, dependente da composição do ligante asfáltico. Alguns irão mostrar uma queda rápida com a temperatura ou a frequência; outros manifestarão uma mudança gradativa. Ligantes asfálticos nesta região podem mostrar combinações significativamente diferentes de G^* e δ .
- Sob altas temperaturas, os valores de δ se aproximam de 90° , para todos os ligantes asfálticos, o que reflete a aproximação do comportamento completamente viscoso ou completa dissipação de energia em fluxo viscoso. Os valores de G^* , no entanto, variam significativamente, refletindo as diferentes consistências dos ligantes asfálticos.

Figura 3.11 - Comportamento reológico típico de CAP: curvas-mestre (frequência). [FAXINA, original de Bahia e Anderson (1995)]

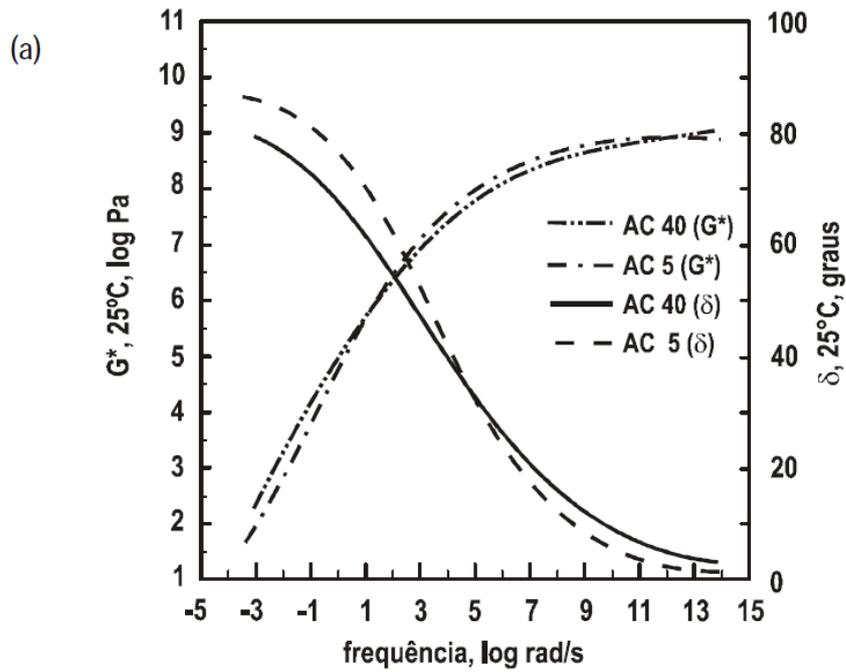
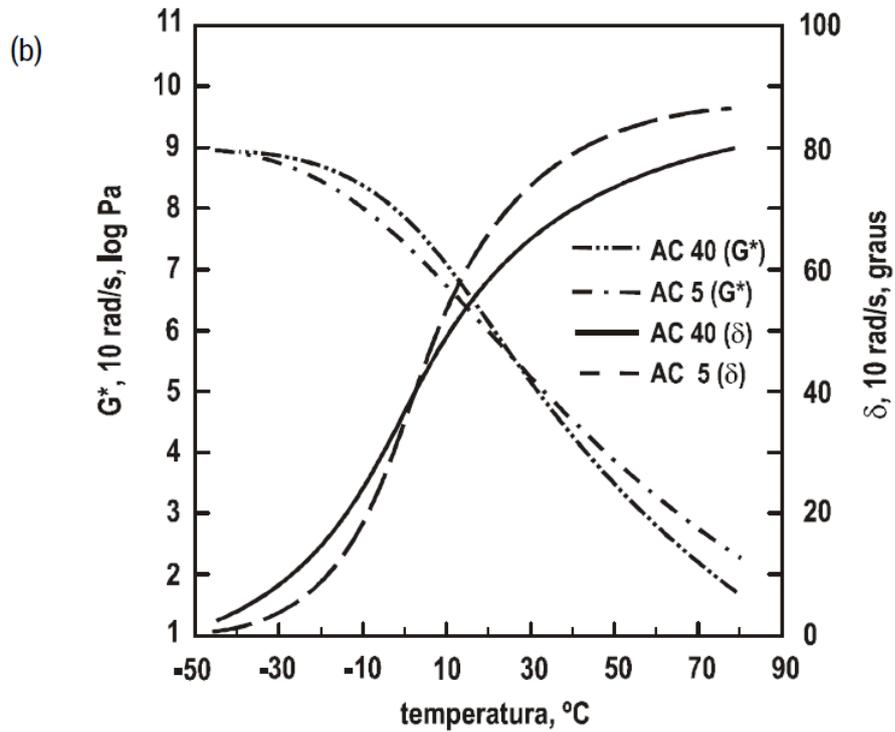


Figura 3.12 - Comportamento reológico típico de ligantes asfálticos: curvas isócronas (temperatura). [FAXINA, original de Bahia e Anderson(1995)]



3.2.6 Varredura de frequência

As amostras do CAP 50/70 e AMP 55/75, puros e modificados foram submetidas a uma Varredura de Frequência de 10^{-2} a 10^2 Hz. Neste ensaio as propriedades de rigidez (G^*) e elasticidade (δ) dos CAP foram medidas. Todas as amostras foram ensaiadas com as temperaturas determinadas no ensaio de PG.

Quando se emprega ligantes asfálticos de comportamento pseudoplástico, a viscosidade a baixas taxas é utilizada para a determinação das temperaturas de usinagem e de compactação de misturas asfálticas. A varredura de viscosidade complexa com frequência é realizada no DSR, em três temperaturas, próximas as temperaturas de usinagem e de compactação das misturas asfálticas. (FAXINA, 2006).

As curvas-mestre são uma representação do comportamento reológico do material, em função da frequência (ou do tempo) de carregamento, empregando uma função reológica qualquer, em uma única temperatura, denominada temperatura de referência, em um espectro de frequências ou tempos de carregamento. O tempo e a temperatura têm efeitos que podem ser intercambiados, ou seja, um determinado aumento na temperatura é equivalente a uma determinada redução na frequência de carregamento. A separação dos efeitos do tempo e da temperatura caracterizam materiais cujo comportamento é denominado termorreologicamente simples. Ao analisar uma curva-mestre, o efeito da frequência alta é equivalente ao da temperatura baixa e o efeito da frequência baixa é equivalente ao da temperatura alta (PAMPLONA, 2013).

3.2.7 Grau de desempenho (PG)

A obtenção do PG foi determinada por meio da execução da norma da ASTM D6373-15 / 2015. Este foi realizado uma varredura de parâmetro $G^*/\sin \delta$ em função das temperaturas (46, 52, 58, 64, 70, 76, 82 e 88°C). O PG corresponde à temperatura na qual os valores de $G^*/\sin \delta$ são superiores a 1,0 kPa e 2,2 kPa, respectivamente para amostras convencionais e envelhecidas no RTFO. A temperatura máxima foi obtida com o ponto de falha determinado no ensaio.

A especificação SUPERPAVE de ligantes mantém o valor do parâmetro de avaliação da característica fixo e verifica para temperatura de uso se aquele material testado satisfaz o valor especificado.

A classificação do CAP é baseada em uma temperatura elevada, temperatura intermediária e uma temperatura baixa. A temperatura elevada refere-se à média máxima de temperatura em sete dias da sua vida útil. A baixa temperatura é a temperatura mais baixa em um único dia da sua vida útil. A classificação é dada PG XX-YY, onde XX é a temperatura elevada aceitável em °C, e YY é a classificação da temperatura negativa mais baixa, em °C (DEDENE, 2011).

Para compor esta classificação dos ligantes asfálticos foram estabelecidos ensaios realizados em temperaturas baixas, médias e altas de uso do CAP no campo. Os CAP são classificados em graus de temperatura máxima e mínima em que apresentam determinadas propriedades, estabelecidas como “grau de desempenho” (PG – *performance grade*) e são, por exemplo: PG 64-22, PG 70-22, PG 76-22 entre outros. Nesta denominação o primeiro número $T_{\max 20\text{mm}}$ é a temperatura de campo, a 20mm de profundidade no revestimento, mais alta durante os sete dias consecutivos mais quentes do ano e o segundo número T_{\min} , incluindo o sinal negativo, corresponde à mínima temperatura do ar no dia mais frio do ano. Os intervalos entre classes são de 6°C nas temperaturas.

Para compatibilizar situações de baixa velocidade, o SUPERPAVE recomenda que o grau a alta temperatura seja elevado de 6 a 12°C. Por exemplo, se o ligante selecionado pelo clima for de grau de desempenho PG 64-22, para acomodar baixas velocidades de carregamento, o projetista pode subir um grau, chegando a PG 70-22. Se estiver previsto carregamento estacionário, o projetista pode selecionar o PG 76-22. Os PG 76 e 82 não correspondem a condições climáticas habituais nos EUA, mas foram criados em função das solicitações de carregamento de baixa velocidade.

As especificações SUPERPAVE para ligantes asfálticos baseiam-se em ensaios reológicos e seus parâmetros correlacionam as características do ligante ao desempenho das misturas asfálticas em serviço (BERNUCCI *et al*, 2010).

3.2.8 *Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)*

O MSCR foi realizado utilizando-se o reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR), modelo Discovery, sendo o fabricante, a empresa TA Instruments. As amostras, de aproximadamente 1 mm de espessura e 25 mm de diâmetro, foram preparadas em moldes específicos de silicone. O ensaio foi realizado a tensão controlada de acordo com a norma ASTM D7405-10a, onde a amostra foi submetida

a tensão constante durante 1 segundo, seguido de repouso sob tensão nula por 9 segundos. Nesta pesquisa, foi utilizada a temperatura de PG como especificado na norma ASTM D7405-10a e, aplicado dez ciclos de fluência e recuperação, sem intervalos entre eles.

Nos dez primeiros ciclos de carregamento é aplicada a tensão de 0,1 kPa e nos dez ciclos seguintes é aplicada a tensão de 3,2 kPa. A cada ciclo de fluência e recuperação, são registradas as seguintes informações:

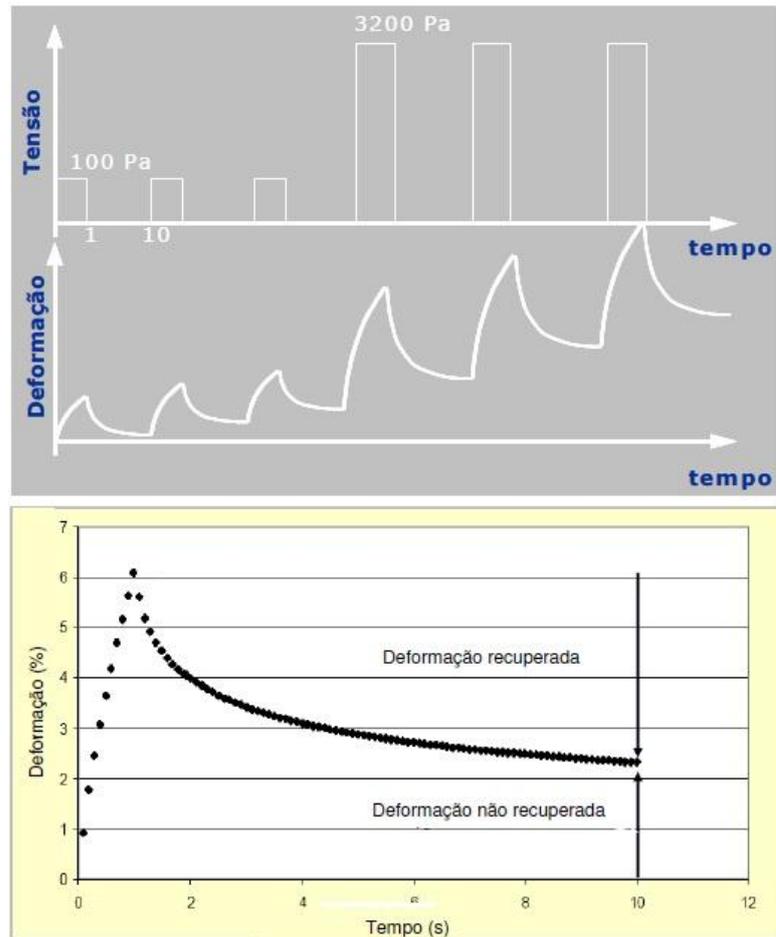
- início do período de fluência de cada ciclo (ϵ_0), no tempo 0 segundo;
- final do período de fluência de cada ciclo (ϵ_c), no tempo 1 segundo;
- final do período de recuperação de cada ciclo (ϵ_r), no tempo 10 segundos;

Na Figura 3.13a, é apresentada o princípio do ensaio do MSCR com relação a tensão e deformação em função do tempo. Na primeira etapa do teste sob a tensão de 0,1 kPa é simulado a condição de tráfego normal e na segunda etapa sob a tensão de 3,2 kPa é simulado o tráfego mais intenso, com a finalidade de avaliação da capacidade do material em manter sua resposta elástica. Na Figura 3.13b é apresentada a deformação em função do tempo para um ciclo de creep.

Neste ensaio são verificados os seguintes parâmetros:

- 1) percentual de recuperação (% R), utilizado para fornecer uma indicação da resposta elástica retardada do CAP;
- 2) compliância não-recuperável (J_{nr}), utilizado para avaliar o potencial do CAP a sofrer deformação permanente;
- 3) $J_{nr, diff}$, utilizado para avaliar a sensibilidade dos CAP à mudanças do nível de tensão.

Figura 3.13 - a) princípio do teste de MSCR; b) deformação *versus* tempo para um ciclo de *creep*. (Fonte: FERNANDES, 2009).



Na especificação SUPERPAVE o parâmetro $G^*/\text{sen}\delta$ é utilizado para caracterizar a resistência dos ligantes asfálticos à deformação permanente. O reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) é utilizado para aplicar carregamentos em regime oscilatório em uma amostra de CAP e, desta maneira, o módulo complexo (G^*) e o ângulo de fase (δ) do material são obtidos. Embora este parâmetro represente adequadamente a resistência dos ligantes asfálticos não-modificados à deformação permanente, pesquisas tem mostrado que o mesmo não ocorre com os ligantes asfálticos modificados e, assim, alternativas foram propostas em estudos como os de Bahia *et al.*, (2001), Bouldin *et al.*, (2001) e Shenoy (2001), a fim de caracterizar, de maneira mais adequada, a resistência dos ligantes asfálticos modificados à deformação permanente.

A compliância de fluência não-recuperável (J_{nr}) é o parâmetro para altas temperaturas obtido no ensaio MSCR. Cada nível representa um tipo de carregamento do tráfego (volume e/ou velocidade) adequado ao material e as

designações são feitas pelas letras S (padrão), H (pesado), V (muito pesado) e E (extremamente pesado) (DOMINGOS, 2011).

A Tabela 3.3 apresenta a classificação do tráfego quanto ao valor do J_{nr} , baseada na norma AASHTO M320-09, a uma tensão de 3.200 Pa na temperatura de PG do pavimento. Segundo Domingos *et al* (2014), esta metodologia fornece ao usuário uma estimativa do número de passadas de eixo-padrão simples (ESALs – *equivalente single-axle loads*) que a mistura asfáltica pode suportar durante a vida útil de serviço. A Tabela 3.4 relaciona os valores mínimos do percentual recuperação para avaliar a resposta elástica retardada do CAP. Uma resposta elástica alta retardada é uma indicação de que o CAP tem uma componente elástica significativa à temperatura de ensaio (ANDERSON *et al*, 2010).

Tabela 3.3 - Classificação quanto ao valor de J_{nr} (AASHTO M320-09) (Pamplona *et al*, 2012 - adaptado)

Valor máximo (kPa^{-1})	Nível de tráfego	Número de solicitações
4,0	Padrão (S)	< 10 milhões e velocidade padrão
2,0	Pesado (H)	> 10 milhões ou velocidade baixa
1,0	Muito pesado (V)	> 30 milhões ou velocidade muito baixa
0,5	Extremamente pesado (E)	> 100 milhões e velocidade muito baixa

A alta elasticidade do CAP é dita quando o percentual de recuperação é superior ao mínimo recomendado para um determinado J_{nr} e a baixa elasticidade quando o percentual de recuperação encontra-se abaixo do mínimo recomendado para um determinado J_{nr} .

Tabela 3.4 – Percentual de recuperação recomendado pelo FHWA. (D'Angelo, 2011) (Pamplona *et al*, 2012 - adaptado)

J_{nr} a 3.2 (kPa^{-1})	% R mínimo
2,0 – 1,01	30
1,0 – 0,51	35
0,50 – 0,251	45
0,25 – 0,125	50

CAPÍTULO 4

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo destina-se a apresentação e análise dos resultados dos ensaios realizados em laboratório. Esta seção será dividida em três partes. Na primeira parte serão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização dos óleos utilizados nesta pesquisa, enquanto a segunda destina-se ao estudo das propriedades físicas do CAP e das misturas. Na terceira parte será analisada a reologia destes materiais.

4.1 Resultados de caracterização físico-química dos óleos

4.1.1 Ensaio de caracterização físico-química dos óleos de soja e de milho

A Tabela 4.1 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização físico-química dos óleos de soja e de milho, novo e residual.

Tabela 4.1 - Caracterização físico-química do óleo de soja e de milho

ÍNDICES	UNIDADES	VALORES ENCONTRADOS			
		OLEO DE SOJA		ÓLEO DE MILHO	
		NOVO	RESIDUAL	NOVO	RESIDUAL
Índice de Acidez	mg KOH/g	0,75	2,21	0,70	1,07
Índice de Iodo	mg I ₂ /100g	56,21	62,68	63,80	62,34
Índice de Peróxido	meq/kg	23,96	21,99	14,99	35,96
Índice de Refração (26°C)	-	73,25	72,60	72,50	72,50
Viscosidade (40°C-50 rpm)	cP	30,00	39,00	35,00	37,00

O óleo de soja residual apresentou um índice de acidez com variação de 194,7% em relação ao óleo de soja novo, enquanto que o óleo de milho residual a variação foi de apenas 52,8% em relação ao mesmo óleo novo. Segundo Cella *et al* (2002) o aumento da acidez indica o desenvolvimento de reações hidrolíticas com a produção de ácidos graxos livres e de diglicerídeos, devido à presença de água e da alta temperatura durante a fritura. Este aumento também indica quebras nas cadeias de trigliceróis e consequente liberação de seus principais constituintes, sendo importante na avaliação do estado de oxidação do óleo (LUCENA *et al*, 2016). O óleo de milho se mostrou mais estável após a utilização em fritura, tendo um índice de acidez menor e consequentemente, menor degradação. Os valores mais

elevados do óleo de soja indicam que o produto está em acelerado grau de deteriorização, este fato ocasiona o endurecimento e alterações das características físicas, químicas e reológicas do CAP, elevando a sua consistência.

O índice de iodo do óleo de soja residual variou 10,32% em relação ao óleo de soja novo e o óleo de milho residual apresentou uma variação negativa de 2,34% em relação ao óleo de milho novo. Segundo Melo (2010) quanto maior o valor encontrado para este índice, maior o grau de insaturação, servindo como indicativo de tendência à oxidação dos óleos vegetais. O óleo de soja novo apresentou valor inferior ao óleo de milho, tornando-o mais susceptível à degradação térmica e oxidativa.

A variação do índice de peróxido foi maior para o óleo de milho residual, apresentando um aumento de 140% em relação ao mesmo óleo novo. No óleo de soja residual foi verificado uma variação negativa em relação ao óleo de soja novo. Na pesquisa de Jorge *et al* (2005) foram analisadas as alterações físico-químicas dos óleos de girassol, milho e soja em frituras após serem submetidos a variados tempos de utilização em frituras (0,5; 1,5; 2,5; 3,5; 4,5; 5,5; 6,5 e 7,5 h). Na pesquisa dos autores os óleos de milho e de soja apresentaram comportamento instável neste índice durante o processo de fritura, que pode ser explicado pelo fato de os peróxidos se decomporem rapidamente em produtos secundários de oxidação nas temperaturas utilizadas nos processos de fritura. Segundo Melo (2010) para a determinação deste índice é utilizada solução de iodeto de potássio. Esta solução pode fixar-se às duplas ligações dos ácidos graxos insaturados, dando um valor menor para o índice de peróxido e, o oxigênio presente no meio pode levar a liberação de iodo levando a um valor errôneo do índice de peróxido por excesso. Diante dos resultados, observa-se que os valores elevados para o óleo de milho e baixo para o óleo de soja não constituem garantia de estabilidade oxidativa.

Segundo Jorge *et al* (2005) o índice de refração é uma característica de cada tipo de óleo e está relacionado com o grau de insaturação das ligações, compostos de oxidação e tratamento térmico. Este índice aumenta com o número de duplas ligações, conjugações e tamanho da cadeia hidrocarbonada. O valor deste índice para o óleo de soja residual diminuiu em relação ao mesmo tipo de óleo novo, e no óleo de milho residual permaneceu inalterado em relação ao óleo de milho novo.

Os valores das viscosidades do óleo de soja residual e óleo de milho residual aumentaram 30,00% e 5,71%, respectivamente. O aquecimento prolongado leva a

polimerização da molécula dos triacilgliceróis, aumentando a viscosidade do óleo. O óleo de milho residual com menor viscosidade tem como resultado interações intermoleculares mais fracas na configuração *cis* pelo aparecimento dos ácidos graxos, dificultando o alinhamento destas moléculas. O óleo de soja residual por ter uma maior viscosidade pode ser caracterizado por maior concentração de poli-insaturados. Assim, diante dos valores encontrados verifica-se que a baixa viscosidade do óleo de milho residual em relação ao óleo de soja residual, oferece melhores condições para a diminuição da viscosidade do CAP quando submetido às altas temperaturas.

4.1.2 Ensaio de espectroscopia (FTIR) dos óleos de soja e de milho

Os óleos de soja e de milho, novos e residuais, foram submetidos ao ensaio de espectroscopia no infravermelho (FTIR), para que fosse possível analisar os grupamentos funcionais da estrutura dos mesmos. Os conjuntos de espectros de infravermelho obtidos são apresentados nas Figuras 4.1 a 4.4. A faixa de 4000 a 650 cm^{-1} do espectro de infravermelho foi selecionada para a análise por ser a faixa mais representativa das características presentes nos espectros das amostras estudadas.

Nas Figuras 4.1 e 4.2 verifica-se semelhanças nos espectros do óleo de soja novo e óleo de soja residual. Diante deste fato, foi realizada a análise do óleo de soja novo e do óleo de soja residual dentro dos comprimentos de ondas semelhantes.

Os dois espectros estudados apresentam banda de absorção em aproximadamente 3000 cm^{-1} referente à estiramento C-H de *cis*-olefinas (=C-H), devido às insaturações dos ácidos linoleico e oleico. A banda de absorção de elevada intensidade referente à vibração de estiramento simétrico e assimétrico dos grupos CH_2 e CH_3 alifáticos é visualizada em aproximadamente 2920 cm^{-1} . A banda de intensidade média atribuída ao grupo $-\text{CH}_3-$ (metil) da cadeia é visualizada em 2850 cm^{-1} .

Observa-se também a deformação axial da ligação da carbonila (C=O) característica de ésteres identificada na banda de absorção de intensidade forte em torno de 1740 cm^{-1} . Na faixa do espectro entre 1464 e 1400 cm^{-1} , encontram-se as deformações angulares simétricas no plano dos grupos alifáticos CH_2 e CH_3 .

As bandas médias que se encontram na faixa entre 1090 e 1320 cm^{-1} estão relacionadas às vibrações de estiramento da ligação C-O dos ésteres, que são, na

verdade, duas vibrações assimétricas acopladas: C-C(=O)-O e O-C-C. Verifica-se também na faixa 720 cm^{-1} uma banda de média intensidade referente a uma deformação assimétrica no plano CH_2 e deformação fora do plano de cis-olefinas dissustituídas.

Figura 4.1 - Espectro de infravermelho do Óleo de Soja Novo

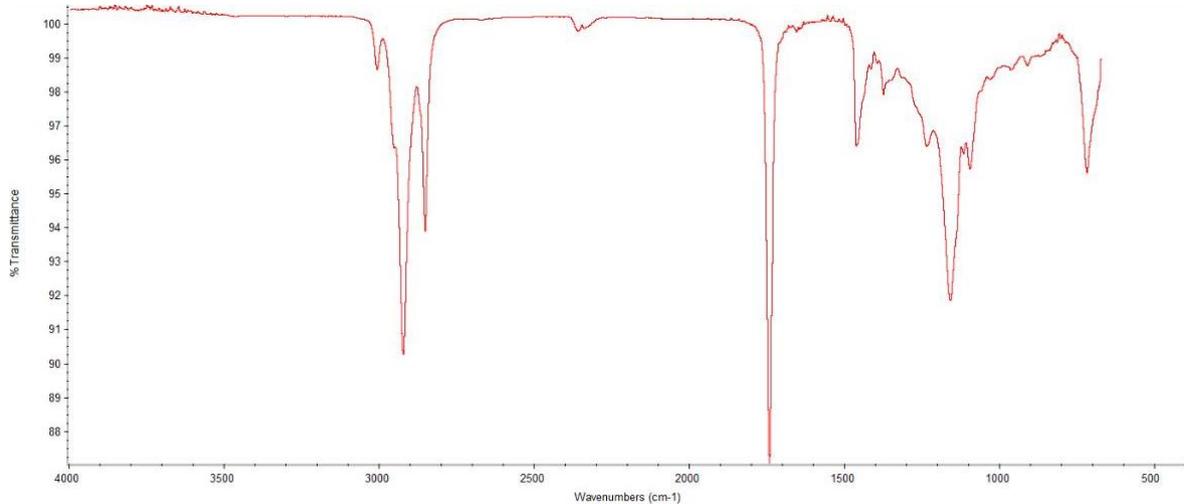
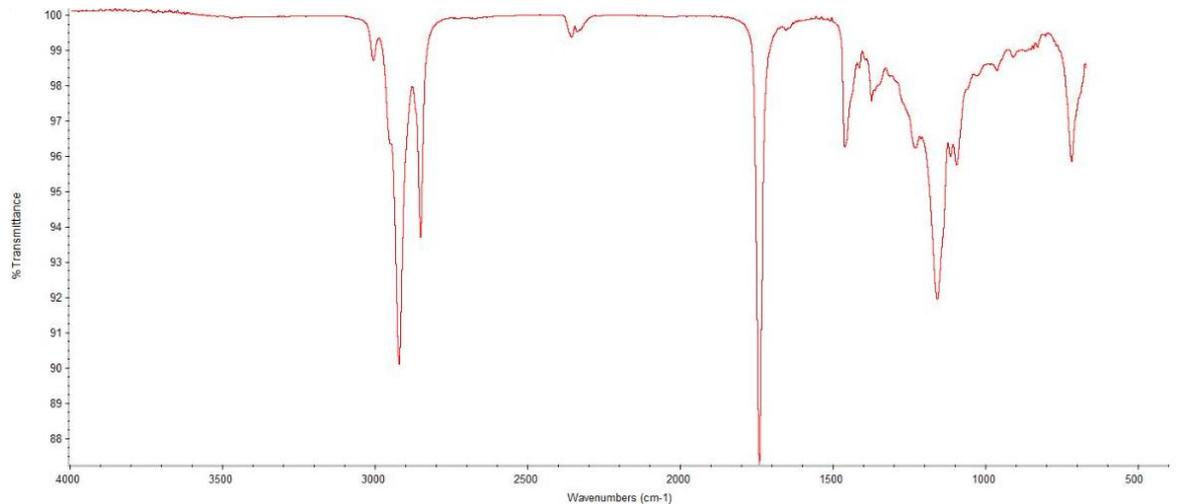


Figura 4.2 - Espectro de infravermelho do Óleo de Soja Residual



Nas Figuras 4.3 e 4.4, onde se tem a espectroscopia do óleo de milho novo e residual, respectivamente, verifica-se pouca diferença entre o óleo novo e residual.

A interpretação dos grupos são as mesmas do óleo de soja novo e residual, sendo diferenciada apenas na intensidade de bandas.

Nos espectros do óleo de soja e de milho observaram-se ausência de ácidos graxos livres, uma vez que não foram verificadas bandas de absorção características da deformação angular fora do plano do grupo O-H (hidroxila) e das deformações axiais C-O dos ácidos carboxílicos, respectivamente.

Figura 4.3 - Espectro de infravermelho do Óleo de Milho Novo

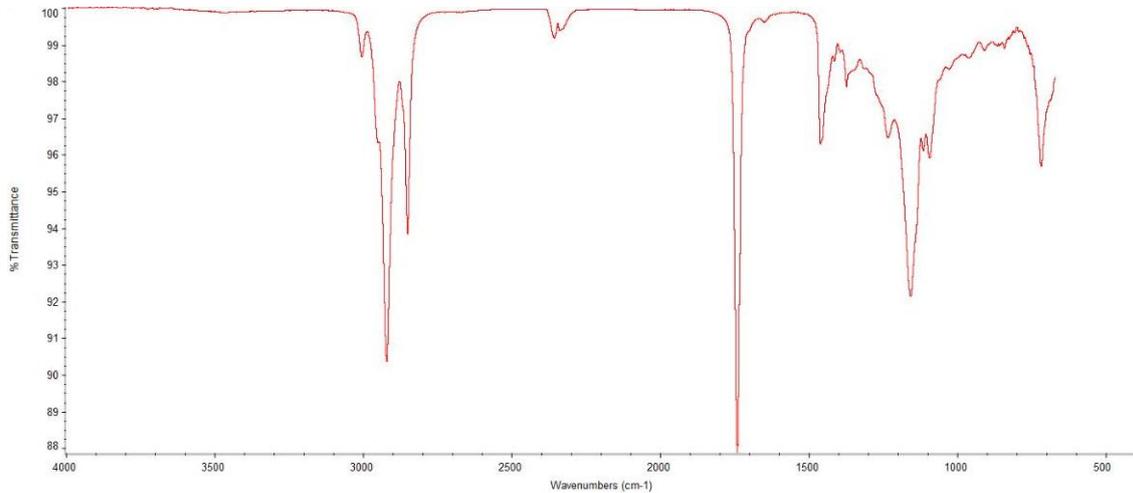
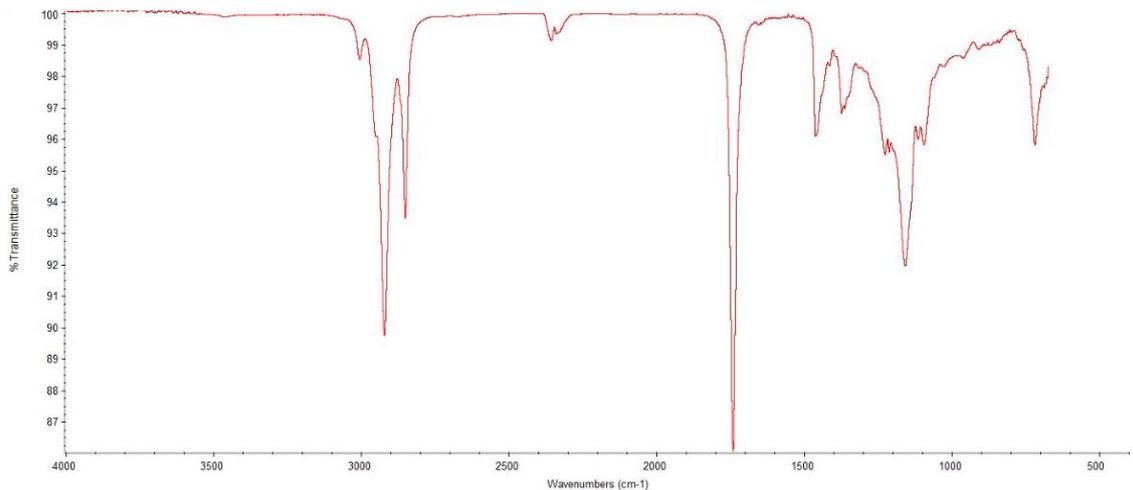


Figura 4.4 - Espectro de infravermelho do Óleo de Milho Residual



Neste ensaio foi verificado que na comparação entre o óleo de soja e de milho (novo e residual), verifica-se que o estiramento C – H foi preservado. Ou seja, o estiramento carbonílicos não foi comprometido significativamente, o que caracteriza que usando óleo residual nas misturas, espera-se não haver perdas significativas das propriedades do CAP.

4.2 Propriedades físicas do CAP modificados

4.2.1 Ensaio de penetração

As Figuras 4.5 e 4.6 apresentam os resultados do ensaio de penetração para as amostras modificadas com o óleo de soja e óleo de milho, respectivamente. Verifica-se um aumento nos valores da penetração em relação ao CAP 50/70 puro, indicando uma diminuição na rigidez. Pela análise, observa-se que não há diferença significativa em utilizar na mistura, o CAP 50/70 com óleo de soja novo ou residual. Os resultados de penetração apresentaram aumento linear com o aumento do teor de óleo, tal qual observado por Asli *et al* (2012), Zargar *et al* (2012) e Sun *et al* (2016), quando empregaram óleo de cozinha residual em sua pesquisa.

A análise comparativa dos teores empregados na pesquisa revelou valores de penetração similares, independente do tipo de óleo empregado.

Pesquisas anteriores Asli *et al* (2012), Seidel *et al* (2013), Zargar *et al* (2012 e Bernucci *et al* (2007) descrevem que o aumento do valor da penetração é causado pela redução na proporção de asfaltenos para maltenos. No entanto, a rigidez do ligante não pode ser totalmente relacionado apenas com os asfaltenos ou matenos, porque estas frações podem ter diferentes propriedades, dependendo da fonte do CAP (SULTANA *et al*, 2014).

Figura 4.5 - Ensaio de Penetração (CAP 50/70 com óleo de Soja)

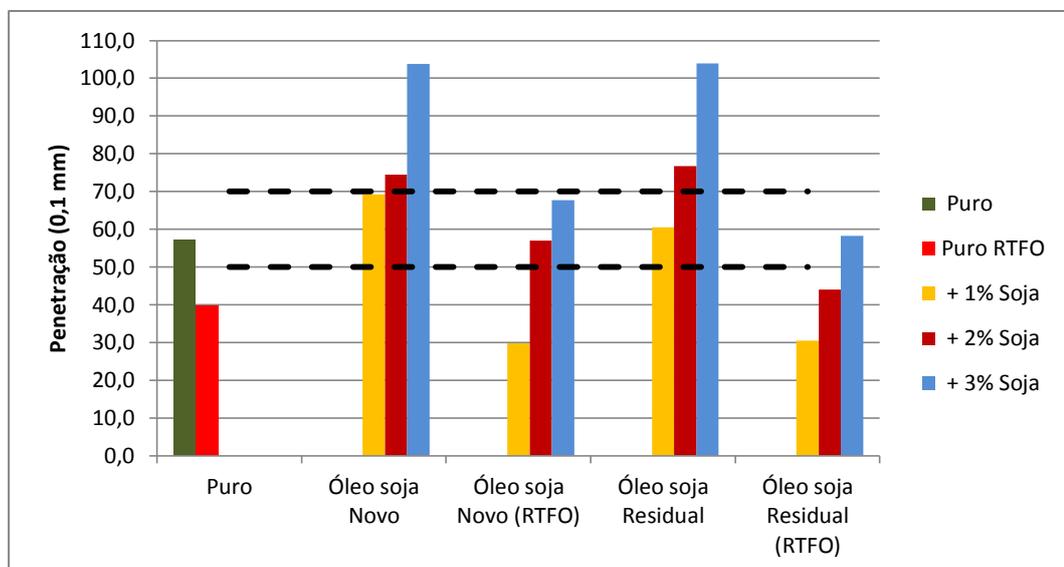
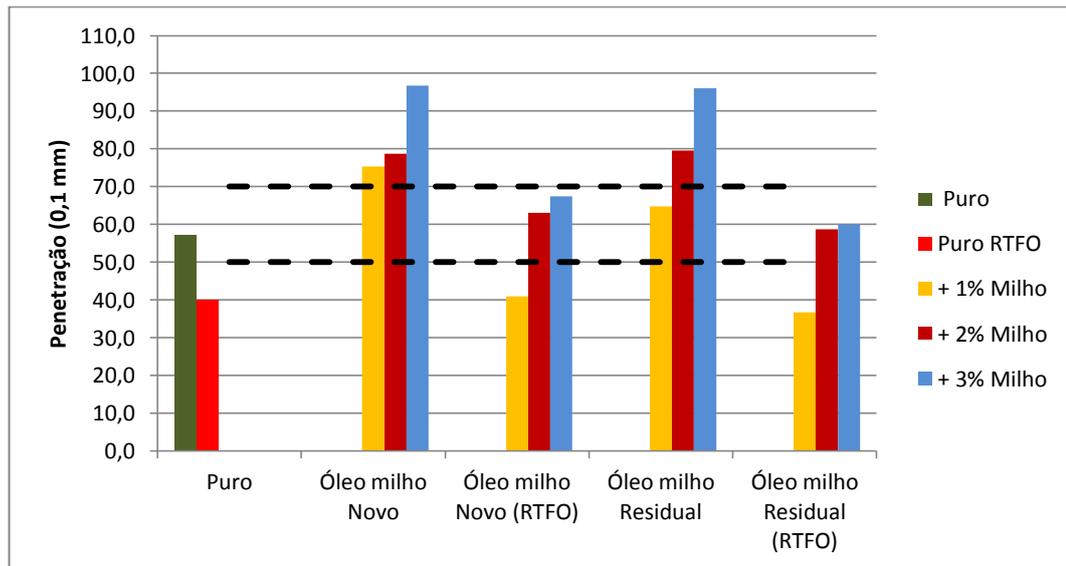


Figura 4.6 - Ensaio de Penetração (CAP 50/70 com óleo de Milho)



A penetração no AMP 55/75, com a adição de óleo de soja e de milho, teve um aumento nos valores, em relação ao AMP 55/75 puro, como observa-se nas Figuras 4.7 e 4.8.

Segundo Fernandes (2009) a adição do óleo ao AMP com polímero aumenta a penetração, uma vez que este plastifica ou amolece a mistura, reduzindo a consistência do asfalto.

Após o envelhecimento em curto prazo em RTFO houve uma diminuição nos valores da penetração, o que caracteriza a ocorrência de envelhecimento do CAP. No entanto em comparação como CAP puro envelhecido, os valores da penetração dos CAP modificados com os óleos foram superiores, tendo o óleo contribuindo para a diminuição do envelhecimento.

O envelhecimento é uma consequência da oxidação das frações mais leves que se tornam mais pesadas, ocasionando um leve aumento na concentração de resinas e asfaltenos, e consequente diminuição de saturados e aromáticos (FERNANDES, 2009). As Figuras supracitadas mostram poucas diferenças entre os valores de penetração alcançados quando comparados os CAPs modificados com óleo de soja e com o óleo de milho. Entretanto, verifica-se que os CAPs modificados com óleo de soja apresentaram menor penetração (maior rigidez) que os modificados com o óleo de milho, esse fato corrobora os resultados encontrados no ensaio de Índice de Acidez.

Não foi observada diferença significativa no emprego do óleo de soja ou de milho, novo ou residual. Nas Figuras 4.7 e 4.8 observa-se que as especificações da Norma DNIT 129/2011-EM são atendidas com o envelhecimento em curto prazo para o óleo de soja com teores de 2% e 3%. Para o óleo de milho novo pós-RTFO atende para os percentuais até 2% e residual até 3%.

Figura 4.7 - Ensaio de Penetração (AMP 55/75 com óleo de Soja)

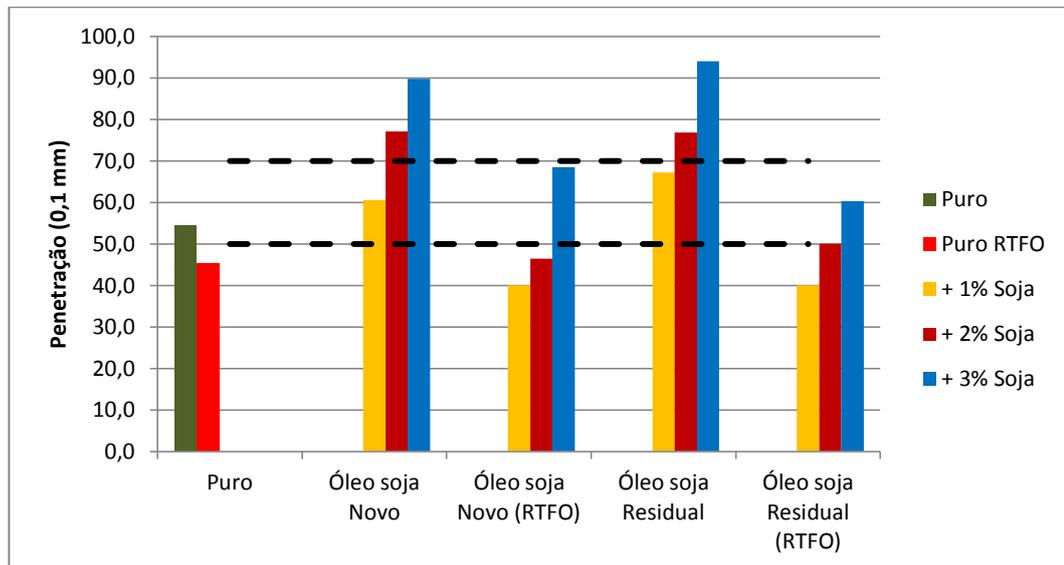
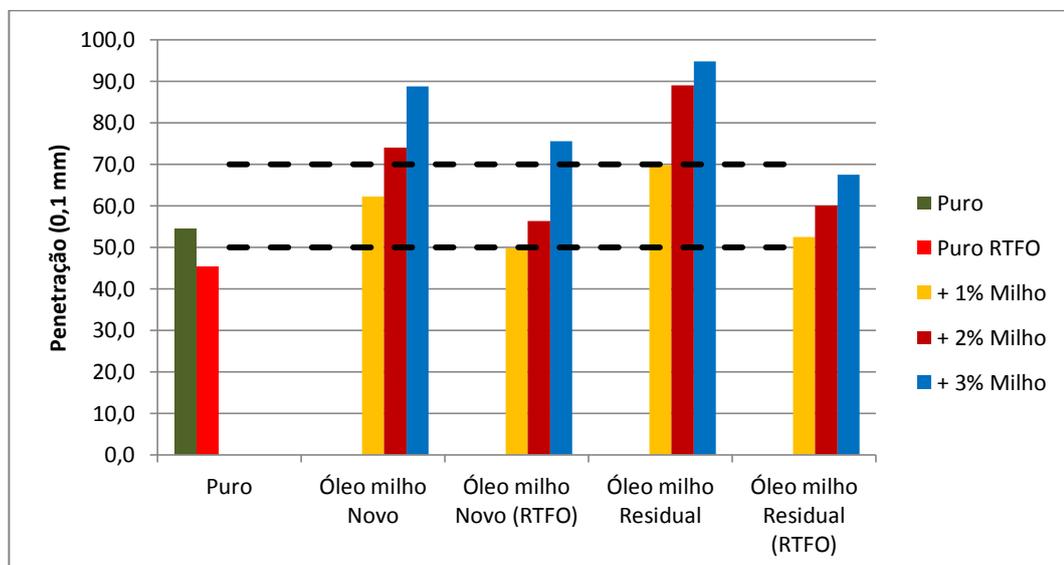


Figura 4.8 - Ensaio de Penetração (AMP 55/75 com óleo de Milho)



A Tabela 4.2 apresenta valores da penetração retida com o emprego do CAP 50/70 e a Tabela 4.3 com o emprego do AMP 55/75.

Tabela 4.2 - Penetração Retida (CAP 50/70)

CAP 50/70	PURO	1%	2%	3%
Puro	69,87%			
Óleo de soja (novo)		42,96%	76,51%	65,30%
Óleo de soja (residual)		50,41%	57,33%	56,01%
Óleo de milho (novo)		54,43%	80,00%	69,77%
Óleo de milho (residual)		56,76%	73,90%	62,50%

Tabela 4.3 - Penetração Retida (AMP 55/75)

AMP 55/75	PURO	1%	2%	3%
Puro	83,03%			
Óleo de soja (novo)		66,11%	60,39%	76,32%
Óleo de soja (residual)		59,48%	65,15%	64,10%
Óleo de milho (novo)		79,92%	76,01%	85,07%
Óleo de milho (residual)		75,27%	67,42%	71,24%

Segundo Silva (2011) a penetração retida mede a capacidade que um ligante tem de manter sua característica de penetração após o procedimento de envelhecimento em estufa RTFO. Quanto mais próximo de 100% menor é a alteração do valor de penetração no envelhecimento RTFO.

Nas misturas com o CAP 50/70 (Tabela 4.2) observa-se para o teor de 1% uma penetração retida abaixo ao valor normativo de 55,00% e menor que o CAP 50/70 puro, mostrando uma variação significativa da penetração antes e após o RTFO. A exceção foi com o teor de 1% de óleo de milho residual, onde apresentou uma penetração retida superior a norma DNIT 095/2006. A penetração retida estando abaixo do CAP 50/70 puro, reflete uma resistência menor ao envelhecimento.

A penetração retida com teores de 2% e 3% de óleo de soja e de milho, apresentam valores superiores aos parâmetros normativos, estando o teor de 2%

com valores superiores ao CAP referência, mostrando uma melhor resistência ao envelhecimento.

Na Tabela 4.3 verifica-se que a variação da penetração retida encontra-se no intervalo de 59,48% a 85,07%, ou seja, a maioria dos teores enquadram-se no preconizado pela Norma DNIT 129/2011, excetuando-se o teor de 1% de óleo de soja residual, que não atinge o parâmetro mínimo de 60,00%. Contudo observa-se que à exceção do teor de 3% de óleo de milho novo, todos os demais encontram-se abaixo do AMP 55/75 puro.

Os ligantes asfálticos modificados por polímero geralmente apresentam boas características quanto à resistência ao envelhecimento. A maior viscosidade do AMP incrementa a espessura de película sobre o agregado, esta característica protege o revestimento do envelhecimento acelerado (MORILHA JÚNIOR, 2004).

Diante dos resultados do ensaio de penetração, verifica-se que o óleo de soja e de milho, interfere no comportamento do CAP Puro, aumentando a penetração e conseqüentemente, diminuindo a rigidez. Não há mudanças significativas em utilizar óleo novo ou residual, tanto na mistura com o CAP 50/70 ou mesmo com AMP 55/75. Os resultados alcançados com a caracterização dos óleos (índice de iodo, peróxido e índice de acidez) corroboram os observados nos ensaios de penetração, ou seja, o óleo de milho apresenta uma menor susceptibilidade ao envelhecimento do que o de soja.

A empregabilidade da mistura de CAP com óleo de soja ou de milho é possível diante de um teor que não extrapole os padrões normativos (DNIT 095-2006 e DNIT 129-2011). Assim, nesta pesquisa, foi verificado que o teor de 1% é o que mais se enquadra nas normas quanto à penetração antes do envelhecimento e acima de 2% para as misturas pós envelhecimento. Na pesquisa realizada por Sun (2016) foi verificado que a penetração aumentou com a adição de subproduto do refino de óleo de cozinha e, aumentou mais rapidamente quando o teor passou de 4%. Asli *et al* (2011) adicionou em sua pesquisa de rejuvenescimento do CAP, teores de 1%, 2%, 3%, 4% e 5% de óleo de cozinha residual, e os autores observaram que o valor da penetração aumentou com o aumento do teor de óleo utilizado.

Entretanto, quando se considera a penetração retida, que trata da resistência ao envelhecimento da mistura, embora estejam dentro dos parâmetros normativos, mostram-se na sua maioria, menos resistentes ao envelhecimento que o CAP Puro,

com exceção das misturas com CAP 50/70 e 2% de óleo de milho (novo e residual) e também mistura de 3% de óleo de milho novo com AMP 55/75.

Os teores de 2% e 3% de óleo de soja e de milho (novo e residual) pós-RTFO, apresentam maior penetração em relação ao CAP novo envelhecido a curto prazo, indicando a contribuição do óleo na diminuição do envelhecimento.

4.2.2 *Ensaio de ponto de amolecimento (método anel e bola)*

As Figuras 4.9 e 4.10 apresentam os resultados dos ensaios do ponto de amolecimento, quando empregado o CAP 50/70 com teores de óleo de soja e óleo de milho.

Os valores do ponto de amolecimento, quando adicionado teores acima de 1% de óleo de soja e de milho, diminuem em relação ao CAP 50/70 puro. Os trabalhos Asli *et al* (2012), Zargar *et al* (2012) e Sun *et al* (2016), apresentaram o mesmo comportamento quando adicionado resíduos de óleo de cozinha. No entanto, há um aumento dos valores quando a mistura é envelhecida em curto prazo, tendo em vista a oxidação e a volatilização das partes leves das misturas. Após RTFO, os asfaltenos com peso molecular elevado podem produzir um CAP mais duro, tornando-o mais viscoso. Há uma alteração na consistência do CAP quando misturado com óleo de soja e do óleo de milho.

Segundo a Norma DNIT 095/2006 o valor mínimo do ponto de amolecimento para o CAP 50/70 é de 46°C, estando os teores de 1% e 2%, de óleo de soja e de milho novos e 1% de óleo de soja e de milho, residual, enquadrados nos padrões normativos. Quando comparado o ponto de amolecimento das misturas pós-RTFO em relação ao CAP puro envelhecido, observa-se que o ponto de amolecimento das misturas mantiveram-se abaixo do CAP puro envelhecido, caracterizando a contribuição do óleo na diminuição do envelhecimento.

Figura 4.9 - Ponto de Amolecimento (CAP 50/70 com óleo de Soja)

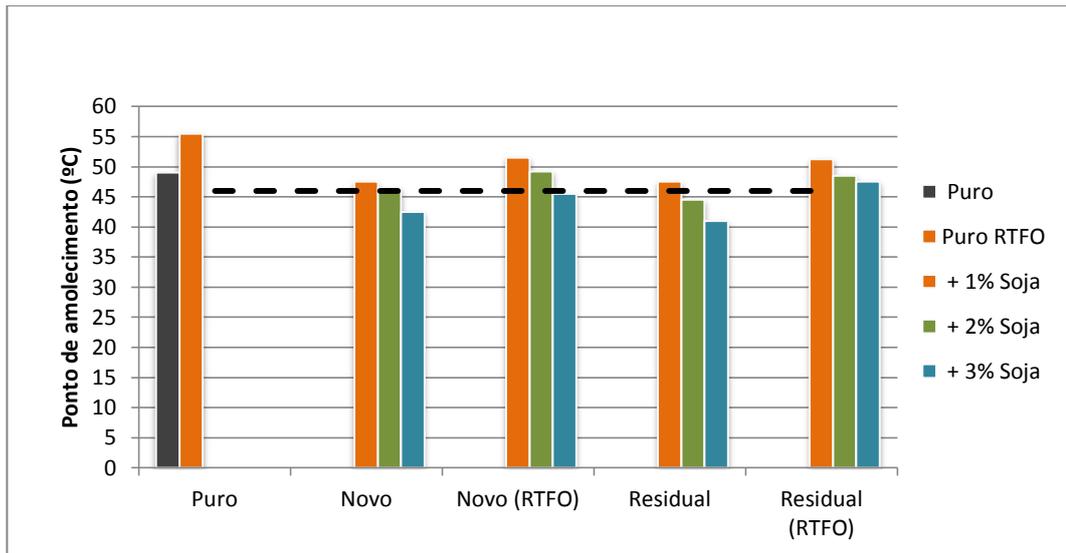
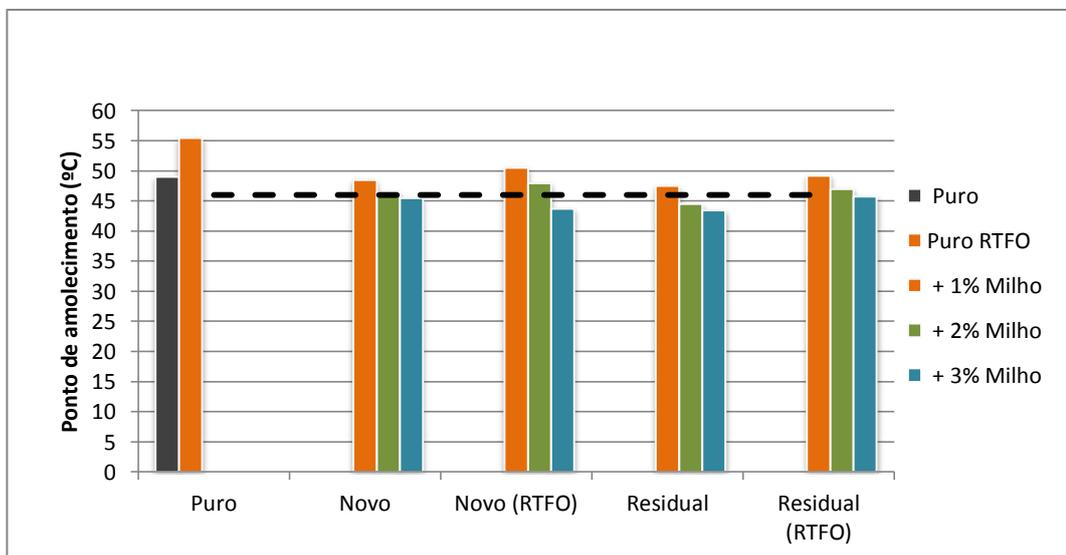


Figura 4.10 - Ponto de Amolecimento (CAP 50/70 com óleo de Milho)



As Figuras 4.11 e 4.12 apresentam os resultados dos ensaios do ponto de amolecimento, quando empregado o AMP 55/75 com teores de óleo de soja e óleo de milho.

Os valores do ponto de amolecimento, quando adicionado teores maiores que 2% de óleo de soja e 1% de óleo de milho, diminuem em relação ao AMP 55/75 puro. O óleo de soja e óleo de milho amolecem a mistura, reduzindo a consistência, conseqüentemente, aumentando a penetração e diminuindo o ponto de

amolecimento. O aumento do teor de óleo acarreta diminuição nos valores do ponto de amolecimento. Comportamento análogo foi observado por Asli *et al* (2012) e Zargar *et al* (2012), onde foram adicionados teores de 1% a 5% de óleo de cozinha residual.

Não foi observado variação entre a utilização do óleo de soja e de milho, novo ou residual.

Figura 4.11 - Ponto de Amolecimento (AMP 55/75 com óleo de Soja)

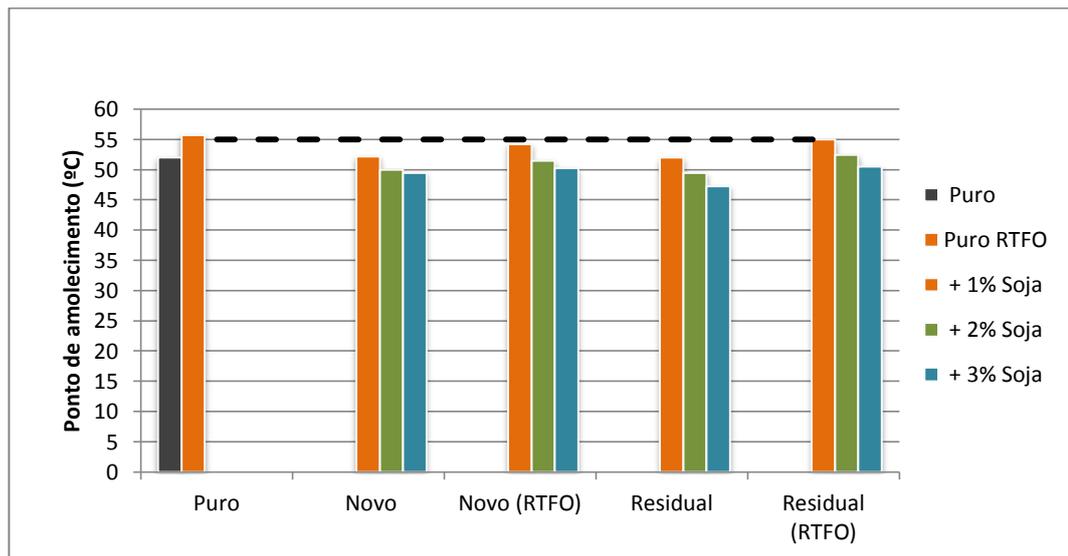
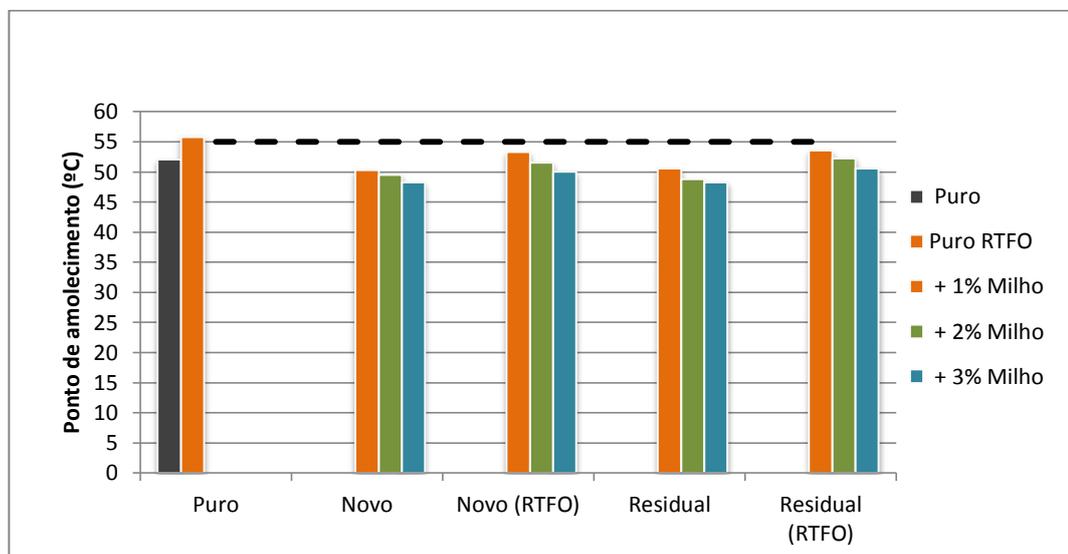


Figura 4.12 - Ponto de Amolecimento (AMP 55/75 com óleo de Milho)



Os resultados estão de acordo com a literatura, onde Asli *et al* (2011) observaram a diminuição do ponto de amolecimento quando adicionaram teores maiores de óleo de cozinha ao CAP para o rejuvenescimento.

O aumento dos teores de óleo de soja e de milho adicionados ao CAP 50/70 e AMP 55/75 diminuem sensivelmente o ponto de amolecimento das misturas. Este fato pode comprometer o comportamento das misturas quando empregadas em campo, tornando o CAP muito sensível às temperaturas do pavimento. No CAP 50/70, torna-se mais seguro o emprego de teores até 1%. Com teores maiores, a temperatura apresenta-se abaixo da especificação normativa, podendo comprometer o desempenho do pavimento em serviço.

Para o AMP 55/75 as amostras com incorporação de óleo e a de referência não atingiram o valor mínimo especificado em norma. Contudo cabe ressaltar que não se deve descartar a possibilidade de emprego dos óleos no AMP 55/75, uma vez que este parâmetro está ligado diretamente ao tipo de AMP 55/75 empregado na pesquisa. Dado que a amostra de referência (pura) não atingiu o mínimo, esperava-se que as misturas modificadas também não atingissem. Ocorre um aumento deste parâmetro quando a mistura é envelhecida a curto prazo, tendo em vista a oxidação e a volatilização das partes leves das misturas. Após o RTFO, os asfaltenos com peso molecular elevado pode produzir um CAP mais duro, tornando-o mais viscoso.

Na Tabela 4.4 verifica-se os resultados do índice de susceptibilidade térmica, com base nos resultados da penetração e ponto de amolecimento. O CAP 50/70, após a adição de teor de 2% de óleo de soja e de milho (residual) e 3% de óleo de soja (novo e residual), apresenta uma variação da suscetibilidade térmica ultrapassando valores normativos (-1,5 a +0,7), conforme especificação DNIT 095/2006 - EM. Esta situação denota a sensibilidade térmica quando adicionado teores elevados de óleo.

Tabela 4.4 - Índice de Suscetibilidade Térmica (CAP 50/70)

CAP 50/70	PURO	1%	2%	3%
CAP Puro	-1,14			
CAP Puro – RTFO	-0,42			
Óleo de soja (novo)		-1,07	-1,17	-1,51
Óleo de soja (novo)-RTFO		-1,88	-1,08	-1,70
Óleo de soja (residual)		-1,40	-1,69	-2,04
Óleo de soja (residual)-RTFO		-1,89	-1,84	-1,49
Óleo de milho (novo)		-0,57	-1,02	-0,73
Óleo de milho (novo)-RTFO		-1,50	-1,17	-2,23
Óleo de milho (residual)		-1,24	-1,59	-1,40
Óleo de milho (residual)-RTFO		-2,02	-1,61	-1,91

Segundo Bernucci *et al* (2007) é desejável que o CAP apresente variações pequenas de propriedades mecânicas, nas temperaturas de serviço dos revestimentos, para evitar grandes alterações de comportamento frente às variações de temperaturas ambiente.

Segundo Faxina (2006) e Fernandes (2009) para caracterizar a dependência da temperatura dos CAP, tradicionalmente, tem-se empregado parâmetros de suscetibilidade térmica. Entretanto, estes parâmetros são limitados, uma vez que são baseados em medidas empíricas, como penetração e ponto de amolecimento, e podem confundir as dependências de tempo e de temperatura ou serem válidos apenas para faixas restritas de temperatura.

As propriedades reológicas dos CAP variam significativamente com a variação da temperatura, embora a forma dessa variação não guarde relação de simetria, já que ela varia de forma “personalizada” em cada CAP, por ser função de dependência direta da sua suscetibilidade térmica. Esta, por sua vez, depende diretamente da constituição química e da forma como as micelas e o meio intermicelar se arranjam para atingir o equilíbrio coloidal estável (DNIT, 1998).

Na Tabela 4.4 observou-se um aumento nos índices de suscetibilidade térmica das misturas pós-RTFO, à exceção dos teores 2% de óleo de soja novo e 3% de óleo de soja residual. Na Tabela 4.5 o aumento é verificado nas misturas, à exceção dos teores de 1% de óleo de milho (novo e residual) e 3% de óleo de milho

novo. Este aumento, diante da baixa variação de massa, após o envelhecimento, onde houve baixa volatilização do CAP, pode caracterizar a transformação de maltenos em asfaltenos, com os óleos ocupando os espaços antes ocupados pelos maltenos. Os óleos tendo menos viscosidade que o CAP, a suscetibilidade térmica tende a aumentar.

De acordo com a Tabela 4.5, as misturas foram mais resistentes à variação de temperaturas com a utilização do AMP 55/75, pois estas apresentaram índices de suscetibilidade térmica mais baixos. O desempenho em altas ou em baixas temperaturas é melhor quando comparadas com CAP 50/70, tendo em vista os baixos índices de suscetibilidade térmica. Esta maior resistência, do AMP 55/75 em relação ao CAP 50/70, faz com que o emprego dos variados teores de óleo influencie menos as misturas quando empregadas em campo.

Tabela 4.5 - Índice de Suscetibilidade Térmica (AMP 55/75)

AMPO 55/75	PURO	1%	2%	3%
CAP Puro	-0,50			
CAP Puro - RTFO	-0,09			
Óleo de soja (novo)		-0,18	-0,10	0,22
Óleo de soja (novo)-RTFO		-0,69	-0,99	-0,36
Óleo de soja (residual)		0,04	-0,25	-0,28
Óleo de soja (residual)-RTFO		-0,53	-0,59	-0,63
Óleo de milho (novo)		-0,61	-0,35	-0,17
Óleo de milho (novo)-RTFO		-0,43	-0,55	-0,16
Óleo de milho (residual)		-0,25	-0,02	0,03
Óleo de milho (residual)-RTFO		-0,24	-0,20	-0,33

4.2.3 Procedimento de envelhecimento de envelhecimento a curto prazo (RTFO)

Na Tabela 4.6 verifica-se o resultado da variação de massa das misturas após a realização do envelhecimento a curto prazo RTFO.

Tabela 4.6 - Variação de Massa (RTFO - CAP 50/70)

CAP 50/70	PURO	1%	2%	3%
CAP Puro	- 0,058%			
Óleo de soja (novo)		- 0,051%	- 0,034%	- 0,043%
Óleo de soja (residual)		- 0,057%	- 0,045%	+ 0,075%
Óleo de milho (novo)		- 0,022%	- 0,030%	- 0,044%
Óleo de milho (residual)		- 0,005%	- 0,073%	- 0,022%

Tabela 4.7 - Variação de Massa (RTFO – AMP 55/75)

AMP 55/75	PURO	1%	2%	3%
CAP Puro	- 0,035%			
Óleo de soja (novo)		- 0,079%	- 0,029%	- 0,015%
Óleo de soja (residual)		+ 0,089%	- 0,033%	- 0,060%
Óleo de milho (novo)		- 0,034%	- 0,044%	- 0,104%
Óleo de milho (residual)		- 0,133%	- 0,033%	- 0,113%

Na Tabela 4.6 a variação está em conformidade com a Norma DNIT 095/2006-EM, com uma variação menor que 0,5%. O AMP 55/75, Tabela 4.7, encontra-se em conformidade com a Norma DNIT 129/2011-EM, a variação está abaixo de 1%.

Para o CAP 50/70, o teor de 2% de óleo de milho residual e 3% de óleo de soja residual, tiveram uma variação de massa maior que o CAP referência. No entanto as demais amostras ficaram com a variação abaixo do CAP referência.

O AMP 55/75 teve uma variação de massa máxima de 0,133%, contudo os valores estiveram abaixo do parâmetro normativo de 1%.

Os valores elevados de variação de massa quando empregado o AMP 55/75 em relação ao CAP 50/70, provavelmente seja devido à existência de aromáticos na sua formulação, no caso agente rejuvenescedor, usado para permitir a compatibilidade entre o CAP puro e variados tipos de polímeros. O aumento da variação de massa pode indicar a volatilização deste componente durante o ensaio (MORILHA JÚNIOR, 2004).

As amostras modificadas com óleo de milho apresentaram menor perda de massa, conseqüentemente menor tendência ao envelhecimento, do que as modificadas com óleo de soja. Este comportamento era esperado em virtude dos resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos óleos.

4.2.4 *Ensaio de viscosidade rotacional*

As Figuras 4.13 a 4.16 apresentam os resultados da viscosidade versus temperatura para as amostras produzidas com o CAP 50/70 e as Figuras 4.17 a 4.20 para as amostras produzidas com o AMP 55/75.

As misturas pesquisadas, sejam com o CAP 50/70 ou AMP 55/75, apresentaram à temperatura de 135°C, viscosidades abaixo das especificações normativas, DNIT 095/2006 e DNIT 128/2011, respectivamente, estando dentro dos limites estipulados pelo SUPERPAVE. A adição dos teores de 1%, 2% e 3% de óleo de soja mantiveram os valores de viscosidade dentro das especificações normativa.

A adição de óleo de soja ou de milho, seja no CAP 50/70 ou AMP 55/75, contribuiu para a diminuição da viscosidade à medida que se aumentou os teores da mistura e temperatura. Neste ensaio, não foi observado diferença significativa quanto ao emprego de óleo novo ou residual.

A partir dos resultados obtidos, verifica-se que no CAP 50/70, com a adição de 1%, 2% e 3% de óleo de soja, a uma temperatura de 135°C, há uma diminuição da viscosidade de 8,63%, 16,71% e 31,54%, respectivamente. Quando utilizado o óleo de soja residual, a variação da viscosidade em relação ao óleo de soja novo, apresenta pouca diferença (Figura 4.13 e 4.14). Após o envelhecimento a curto prazo (RTFO), a diminuição da viscosidade aumenta em média três pontos percentuais em relação as amostras envelhecidas.

Quando utilizado o óleo de milho (Figuras 4.15 e 4.16) verifica-se uma diminuição na viscosidade com o aumento do teor de óleo adicionado. Não foi observado diferença significativa no uso de óleo novo e óleo residual. Houve pouca variação nos percentuais das viscosidades entre os teores 1%, 2% e 3% de óleo, 15,09%, 18,87% e 29,65%, respectivamente.

Na adição dos teores de óleo de soja com o AMP 55/75, verifica-se na Figura 4.13, que a adição de 1%, 2% e 3%, obteve uma diminuição de 15,43%, 24,37% e 27,82% da viscosidade, respectivamente. Quando empregado o AMP 55/75 com óleo de milho obteve uma diminuição de 13,89%, 20,79% e 29,99% da viscosidade,

respectivamente. A variação de viscosidade quando utilizado o óleo de soja e de milho, é pouco significativa, tendo uma diferença máxima de 3%.

Pela análise dos resultados de ensaios de viscosidade dos óleos esperava-se que as amostras com adição de óleo residual apresentassem maior viscosidade que as amostras com adição de óleo novo, entretanto este fato não foi observado. Apesar disto, verificou-se que as amostras modificadas com óleo de soja residual apresentaram viscosidade maior do que as modificadas com o outro óleo, estando isso de acordo com o verificado no ensaio supracitado.

Segundo Gong (2015) para asfalto modificado com SBS, o óleo não só alivia a agregação de moléculas polares, mas também pode penetrar no polímero e reduzir a fricção molecular. Este efeito é responsável pela diminuição de viscosidade.

Os óleos de milho e o de soja possuem uma cadeia polar e outra apolar. A cadeia apolar por apresentar uma estrutura molecular mais organizada promoveu a redução da viscosidade do CAP. Esta redução é benéfica pois resulta numa consequente redução da tensão superficial entre o agregado e o CAP, expelindo o ar retido e aumentando a coesão interfacial entre o CAP e o agregado, melhorando assim as propriedades mecânicas (KAMARUDDIN *et al*, 2014; MAHARAJ *et al*, 2015).

As amostras estudadas nesta pesquisa aumentaram a viscosidade após o envelhecimento, conforme o esperado. A oxidação depende da temperatura e do tempo, os quais alteram a composição química das frações do CAP, o que leva a um aumento do teor de asfaltenos, devido à oxidação de resinas polares e uma diminuição na percentagem de maltenos (ASLI, 2012).

Neste ensaio foi verificado que as adições dos óleos de soja e de milho alteraram o comportamento dos CAPs, diminuindo a viscosidade com relação ao CAP Puro. A utilização de óleo residual, seja com o CAP 50/70 ou AMP 55/75, manteve valores de viscosidade sempre mais baixos em relação a utilização de óleos novos, no entanto a diferença não é tão significativa. Este fato contribui para a utilização ecologicamente correta do óleo residual, despejado no meio ambiente. A adição dos teores de 1%, 2% e 3% de óleo de soja e de milho mantiveram os valores de viscosidade dentro das especificações da norma DNIT 095/2006-EM para o CAP 50/70 e a norma DNIT 129/2011-EM para o AMP 55/75.

O comportamento físico do CAP modificado com óleo residual manteve os padrões encontrados na literatura (ASLI *et al*, 2011; ASLI *et al*, 2012; KAMARUDDIN, *et al*, 2014), onde o óleo residual de cozinha foi empregado em suas pesquisas, com redução da viscosidade do CAP.

Figura 4.13 - CAP 50/70 - Viscosidade Rotacional (Óleo de Soja novo e residual)

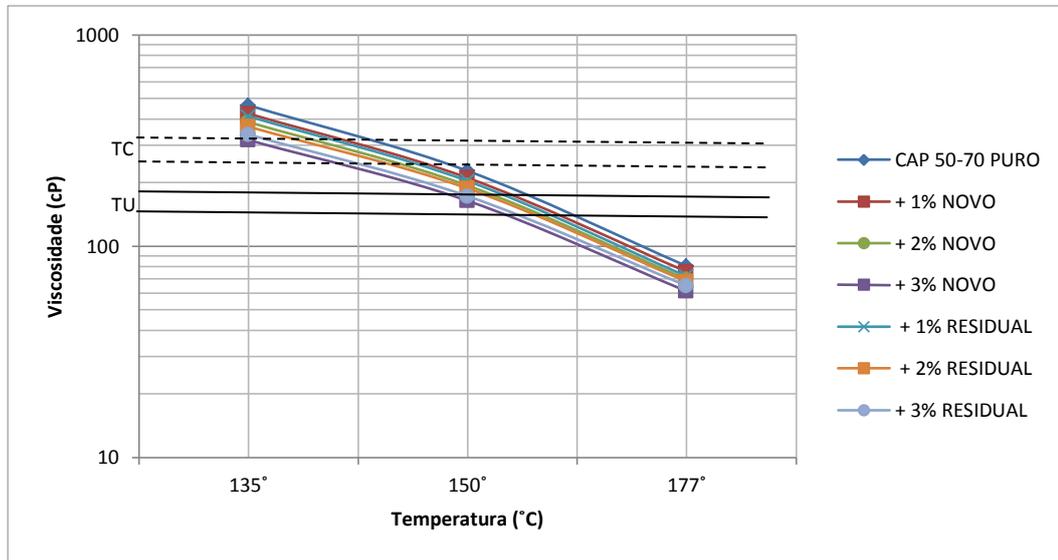


Figura 4.14 - CAP 50/70 - Viscosidade Rotacional-RTFO (Óleo de Soja novo e residual)

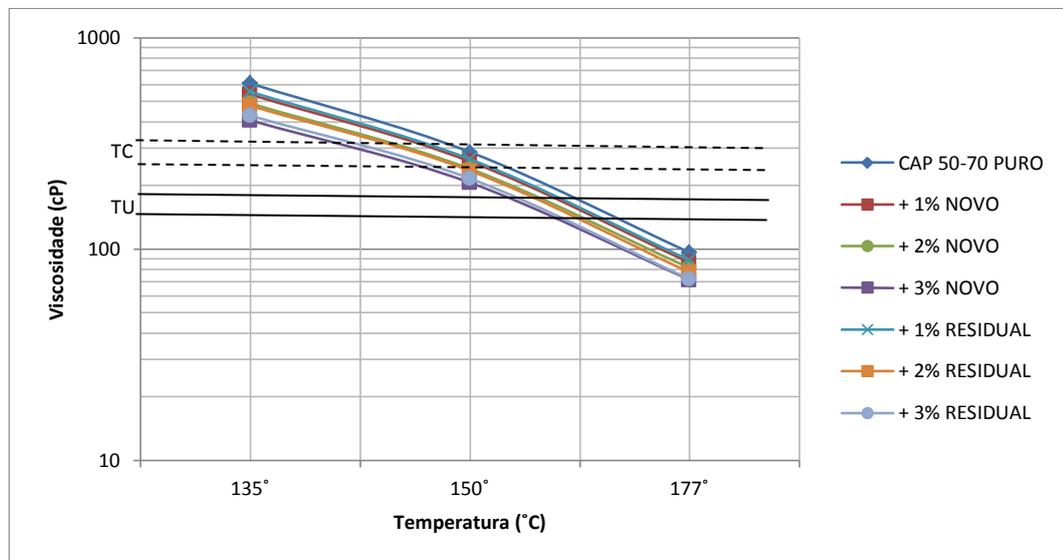


Figura 4.15 - CAP 50/70 - Viscosidade Rotacional (Óleo de Milho novo e residual)

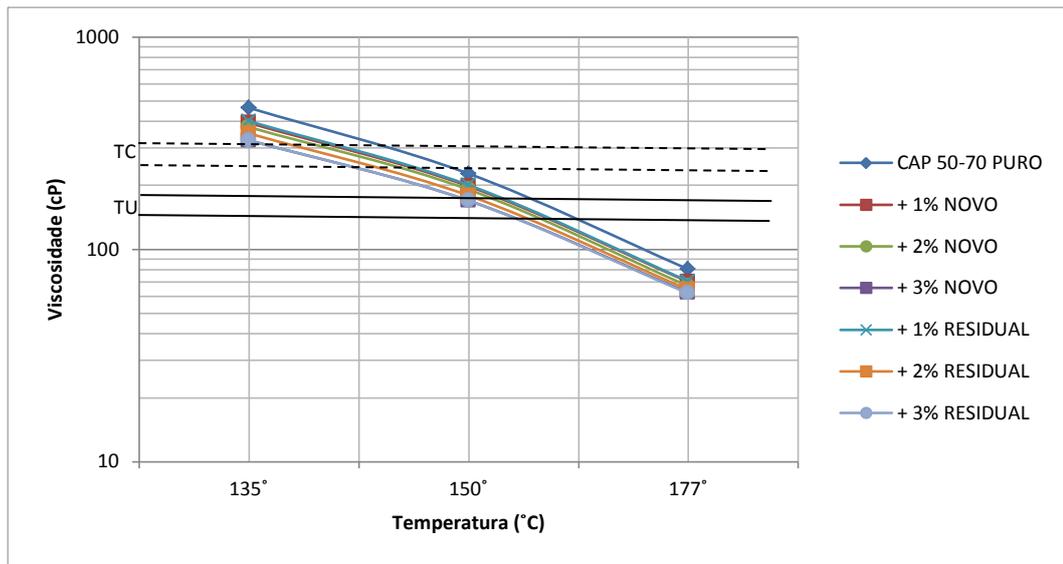
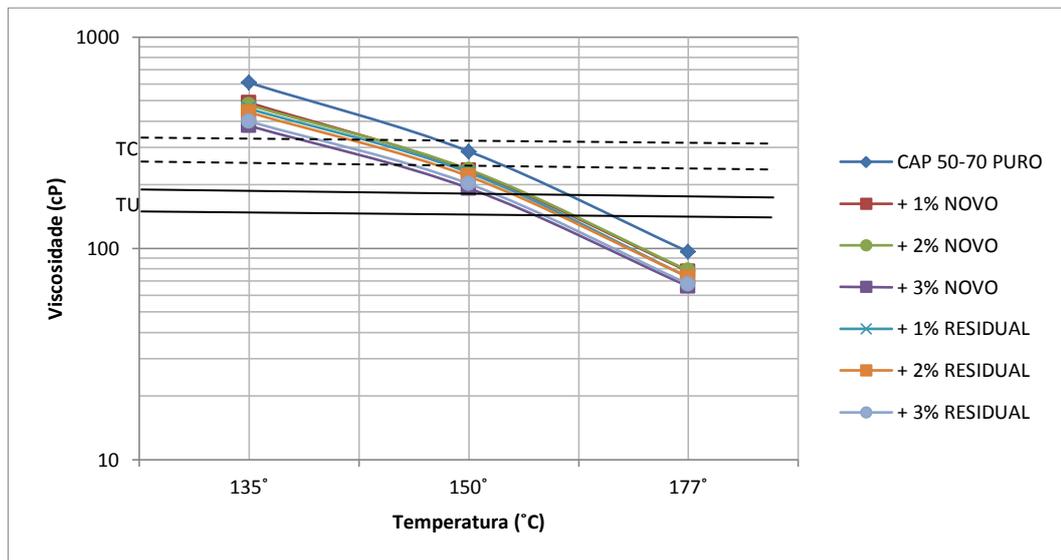


Figura 4.16 - CAP 50/70 - Viscosidade Rotacional-RTFO (Óleo de Milho novo e residual)



Nas Figuras 4.17 a 4.20 foram inseridos os limites de viscosidade para obtenção de temperaturas de usinagem e compactação referente ao CAP não modificado, apenas como referência, haja vista no AMP 55/75 estas temperaturas serem calculadas de forma específica.

Figura 4.17 - AMP 55/75 - Viscosidade Rotacional (Óleo de Soja novo e residual)

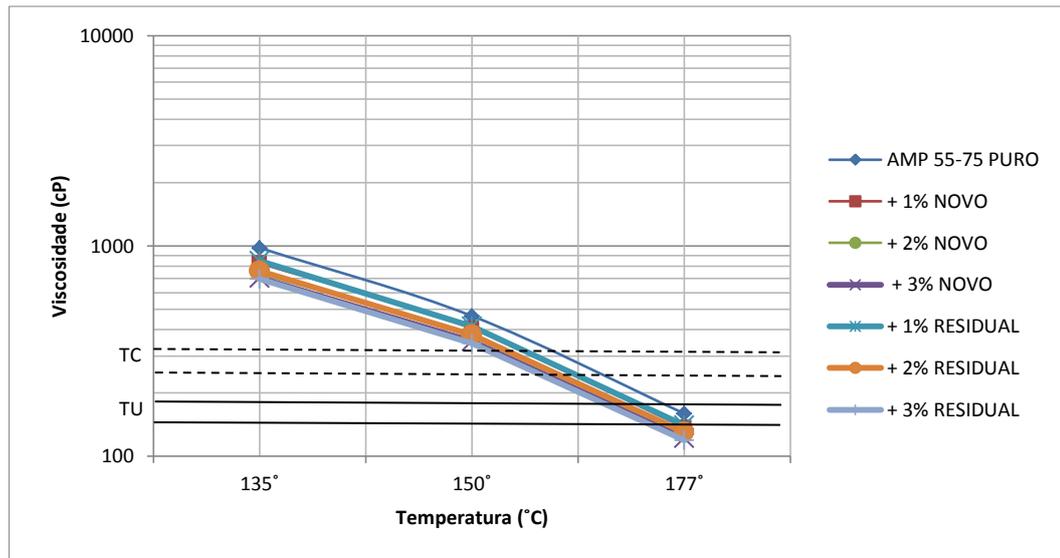


Figura 4.18 - AMP 55/75 - Viscosidade Rotacional-RTFO (Óleo de Soja novo e residual)

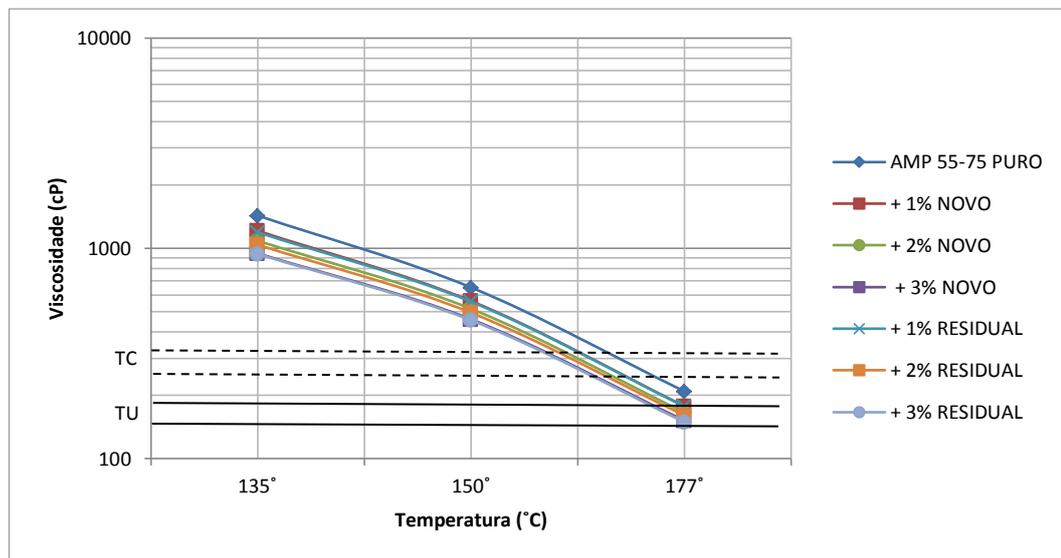


Figura 4.19 - AMP 55/75 - Viscosidade Rotacional (Óleo de Milho novo e residual)

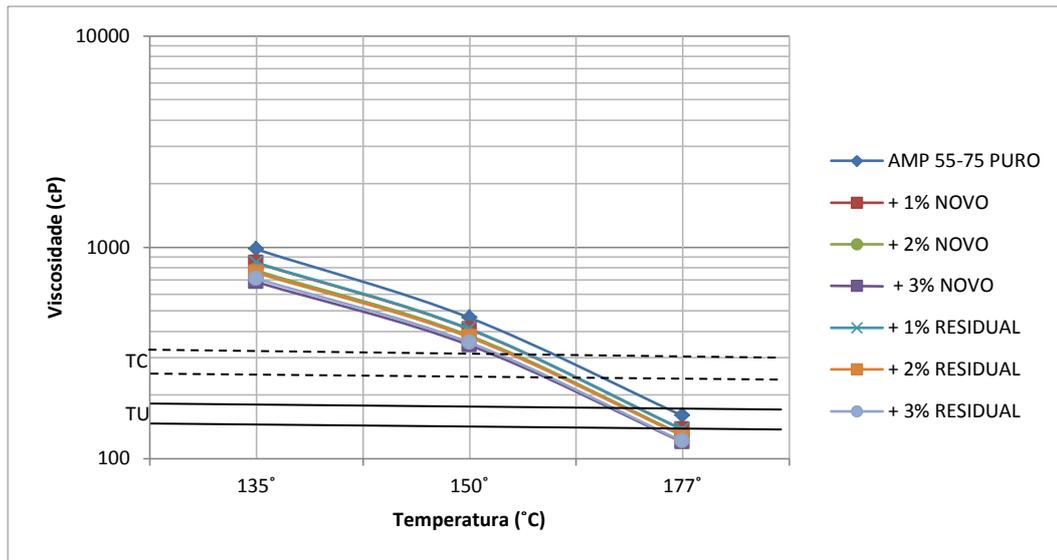
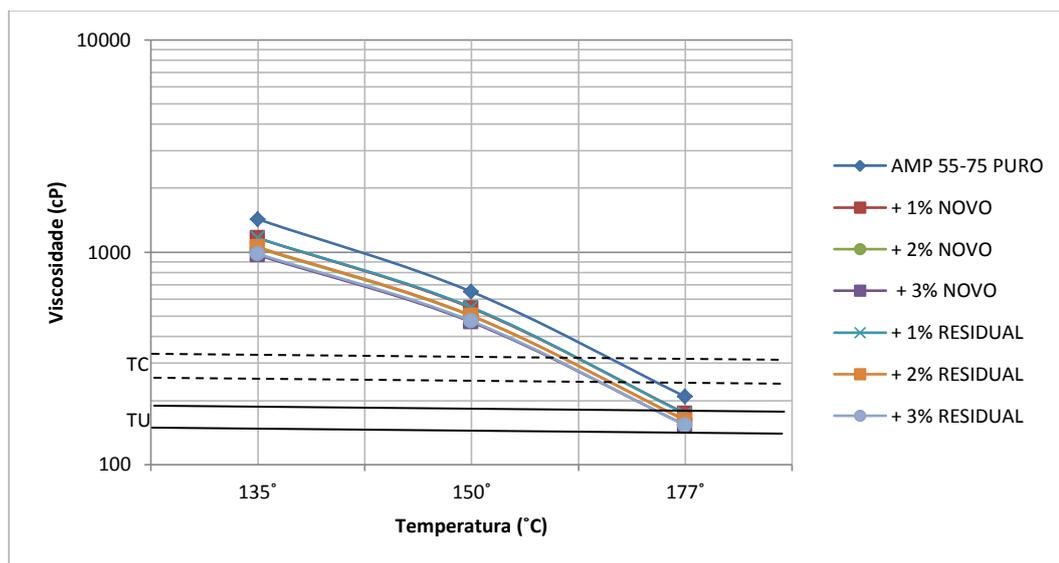


Figura 4.20 - AMP 55/75 - Viscosidade Rotacional-RTFO (Óleo de Milho novo e residual)



4.2.5 Redução da temperatura de usinagem e compactação das misturas

Baseado nos resultados da viscosidade rotacional foi realizada a verificação da diminuição de temperatura das misturas, frente aos teores de óleo de soja e de milho empregados na pesquisa. A Tabela 4.8 apresenta os resultados obtidos para as variações de temperaturas de compactação e de usinagem, do CAP 50/70 modificado com os respectivos teores utilizados. A Tabela 4.9 apresenta os

resultados obtidos para o AMP 55/75, com as faixas de viscosidade para os CAP não modificados, apenas como referência.

Com os dados constantes das Tabelas 4.8 e 4.9 verifica-se que quanto maior o acréscimo de óleo ao CAP há uma interferência direta na diminuição da temperatura da mistura. Os resultados mostram que a diminuição da temperatura é mais significativa com o emprego do CAP 50/70. Na mistura com teor máximo utilizado na pesquisa (3%) obteve-se uma diminuição de temperatura na usinagem de 7,7°C, para a mistura com óleo de soja novo e 6,5°C para a utilização de óleo de soja residual. Na compactação a diminuição de temperatura foi de 7,9°C com o emprego do óleo de soja novo e 6,7°C com óleo de soja residual.

Nas mesmas condições supracitadas, quando empregado o óleo de milho, obteve-se uma diminuição de 7,8°C na usinagem para o óleo novo e residual. Na compactação a diminuição foi de 9,5°C para o óleo novo e 9,0°C para o óleo residual.

Os resultados obtidos por Lucena *et al* (2016), que utilizou óleo de *Moringa Oleifera Lam*, com teores de 0,5%, 1,0%, 1,5%, 2,0%, 2,5% e 3,0%, com os mesmos parâmetros de misturas, apresentaram diminuição de temperaturas próximos ao óleo de soja e milho, quando a autora utilizou 3% de óleo de *Moringa Oleifera Lam*, tendo diminuído 10°C.

Souza (2012) realizou uma pesquisa onde foi adicionado ao CAP 50/70, teores de 2%, 3%, 4%, 5%, 6%, 7%, 8%, 9% e 10% de óleo de mamona. O autor conseguiu diminuir aproximadamente 8°C quando utilizou o teor de 5% de óleo de mamona.

A redução das temperaturas alcançadas com os óleos residuais e novos foram similares. Apesar da redução das temperaturas serem inferiores a 10°C isso não significa que é possível apenas essa redução, fato que impossibilita que estas misturas fossem enquadradas como Misturas Mornas. Quanto trata-se de ativos, orgânicos e surfactantes, a redução das temperaturas de usinagem e compactação devem considerar não apenas os resultados dos ensaios de viscosidade, análise simplista, como também o efeito lubrificante dos aditivos no ligante e tensões superficiais..

O óleo residual em comparação com o óleo novo, mostrou-se com resultados próximos. Sendo assim, a pesquisa comprova a possibilidade de emprego do óleo de soja e de milho residual, para a diminuição da viscosidade do CAP e a

consequente diminuição da temperatura de usinagem e compactação, contribuindo para a destinação ecologicamente correta dos resíduos de óleo.

Tabela 4.8 - Redução de temperatura CAP 50/70

CAP 50/70 - ÓLEO DE SOJA						
FASE	NOVO			RESIDUAL		
	1%	2%	3%	1%	2%	3%
USINAGEM (°C)	1,5	3,7	7,7	2,7	4,7	6,5
COMPACTAÇÃO (°C)	2,2	3,7	7,9	2,7	4,4	6,7
CAP 50/70 - ÓLEO DE MILHO						
USINAGEM (°C)	3,8	4,8	7,8	3,5	6,5	7,8
COMPACTAÇÃO (°C)	4,0	5,5	9,5	3,5	7,0	9,0

Tabela 4.9 - Redução de temperatura AMP 55/75

AMP 55/75 - ÓLEO DE SOJA						
FASE	NOVO			RESIDUAL		
	1%	2%	3%	1%	2%	3%
USINAGEM (°C)	3,3	5,0	6,0	2,8	4,3	6,8
COMPACTAÇÃO (°C)	3,5	5,5	7,0	3,0	5,3	7,3
AMP 55/75 - ÓLEO DE MILHO						
USINAGEM (°C)	3,7	5,2	7,5	3,7	5,7	7,2
COMPACTAÇÃO (°C)	3,3	5,0	7,5	3,3	5,3	6,8

4.3 Resultados ensaios reológicos

4.3.1 Ensaio de PG (Performance Graded)

As Figuras 4.21 e 4.22 apresentam as temperaturas de PG determinados quando utilizado o CAP 50/70. Na pesquisa não foi verificado a temperatura baixa, tendo em vista a maior parte do território brasileiro ser de clima tropical e com temperaturas médias de 25°C. O PG determinado seguiu a especificação SUPERPAVE, onde $G^*/\text{sen}\delta$ é superior a 1,0 kPa antes do RTFO e superior a 2,2 kPa após o RTFO. Segundo a metodologia, estes valores são capazes de garantir a adequada resistência ao acúmulo de deformações permanentes no que diz respeito ao CAP.

Quando utilizado o CAP 50/70 com óleo de soja (Figura 4.21), verifica-se diminuição de PG com o teor de 3% de óleo de soja novo e residual em relação ao CAP Puro. Na Figura 4.22 quando foi utilizado óleo de milho, houve o aumento de

PG para o teor de 1% novo e residual, e 2% de óleo de milho novo. Após o envelhecimento RTFO houve a redução de PG para o teor de 3%, e 2% residual. Segundo Lei (2015) esta redução pode ser benéfica pois quanto menor a rigidez, menor será o stress térmico do asfalto quando da mudança da temperatura, o que pode reduzir o risco de fissuração do pavimento.

Figura 4.21 - Variação do PG com CAP 50/70 e Óleo de Soja

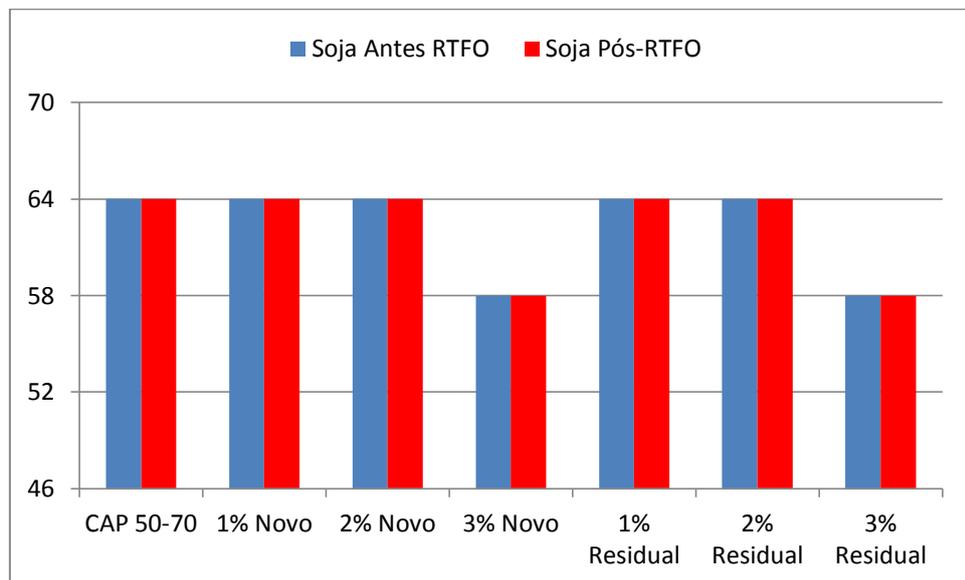
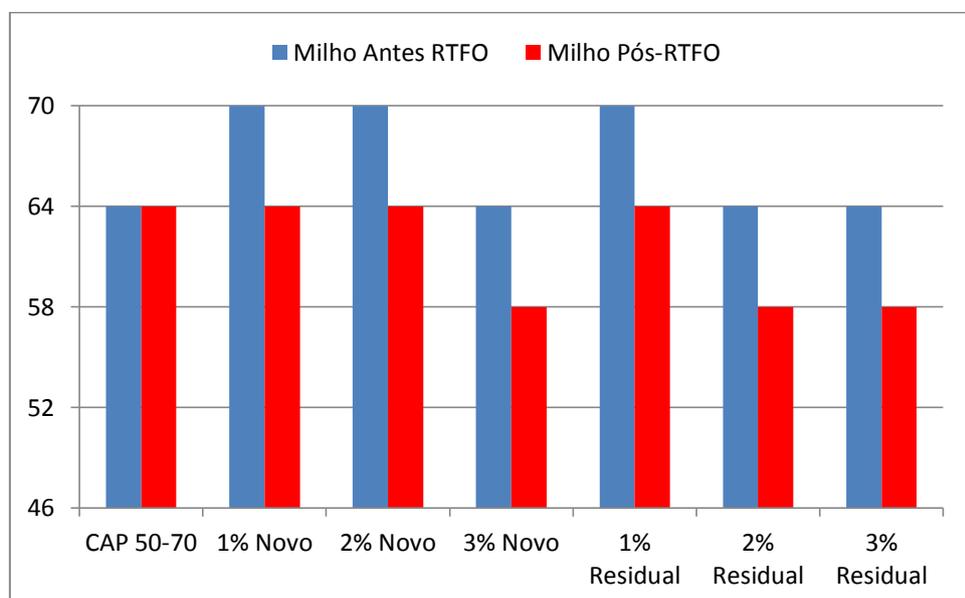


Figura 4.22 - Variação do PG com CAP 50/70 e Óleo de Milho



As Figuras 4.23 e 4.24 apresentam as temperaturas do PG encontradas quando utilizado o AMP 55/75.

Na Figura 4.23 verifica-se que todos os AMP 55/75 modificados com teores de óleo de soja (novo e residual) diminuíram o PG antes e após o envelhecimento RTFO, à exceção dos teores de 1% e 2% de óleo de soja novo, que mantiveram o mesmo PG do AMP 55/75 puro. Na Figura 4.24 quando utilizado o óleo de milho, o teor de 1% de óleo novo e residual permaneceram sem diminuição do PG, os demais teores diminuíram em relação ao AMP 55/75 puro.

Figura 4.23 - Variação do PG com AMP 55/75 e Óleo de Soja

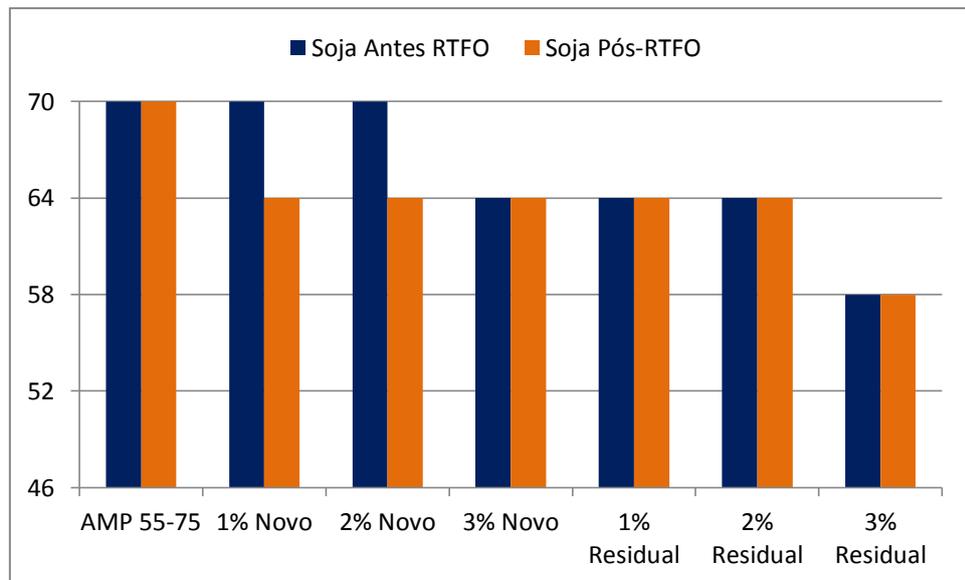
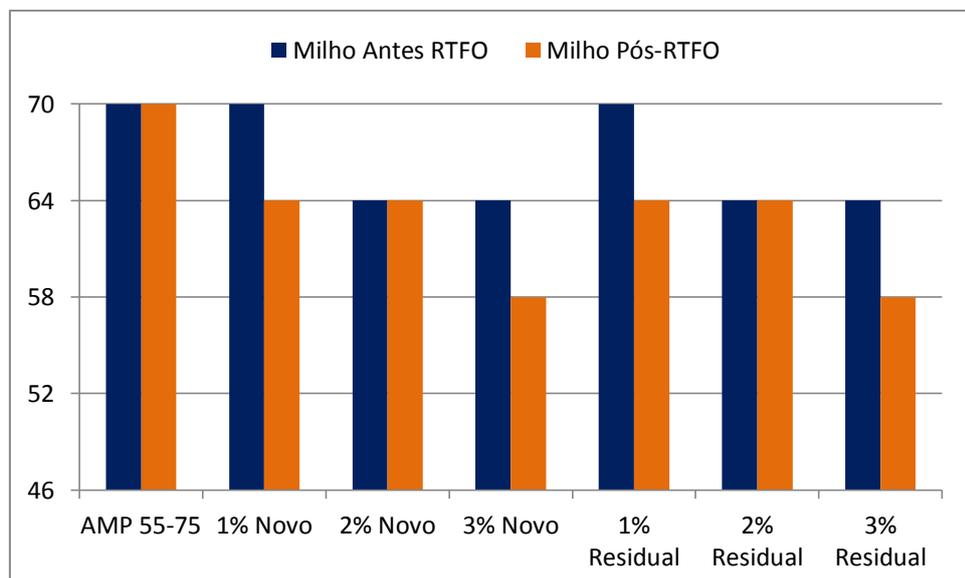


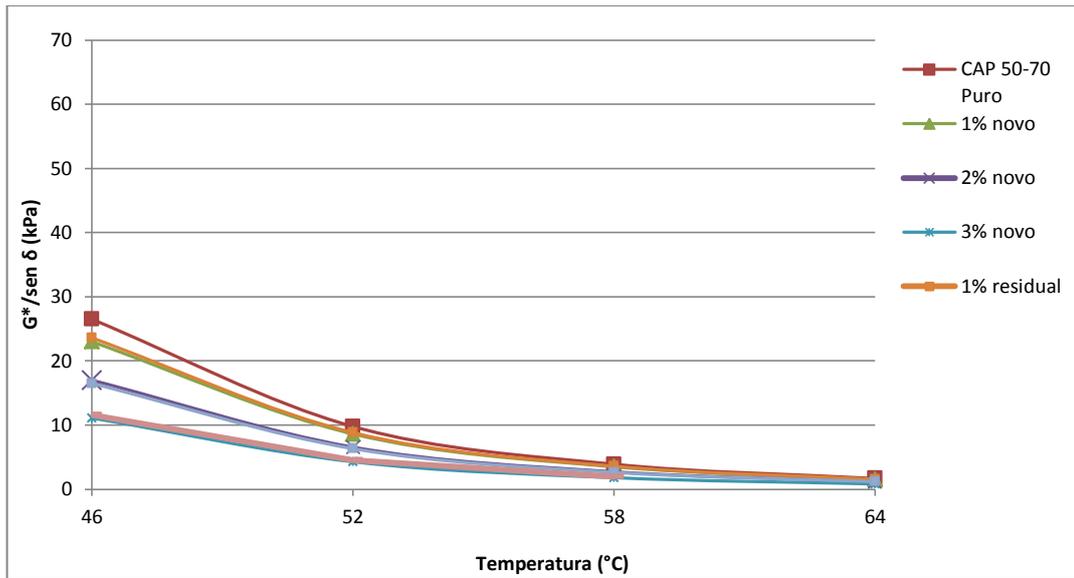
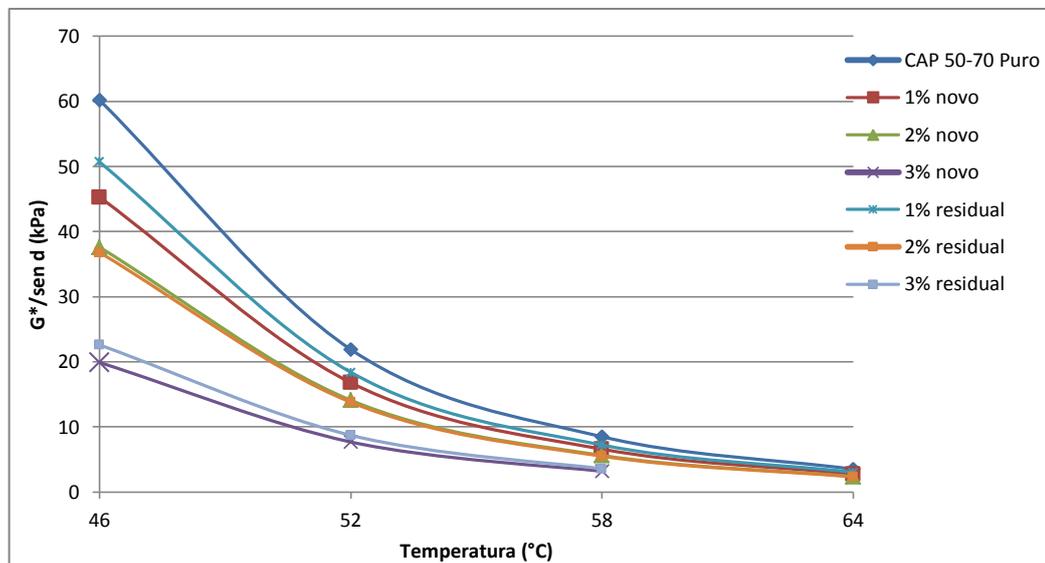
Figura 4.24 - Variação do PG com AMP 55/75 e Óleo de Milho



O Grau de Desempenho do CAP obtido nas misturas desta pesquisa indica que os mesmos possuem propriedades físicas adequadas para o emprego em campo. Estas devem ser as temperaturas mais elevadas do pavimento em serviço, dentre as regiões de emprego.

Nas Figuras 4.25 e 4.26 são ilustradas as curvas $G^*/\text{sen}\delta$ versus temperatura na faixa de 46°C a 70°C, para o óleo de soja antes e após o procedimento de envelhecimento em curto prazo, respectivamente. O parâmetro $G^*/\text{sen}\delta$ diminuiu com o aumento do teor de óleo de soja novo e residual e da temperatura. Não foi observada diferença significativa entre os resultados do óleo de soja novo e residual, no entanto o emprego do óleo residual mostrou-se um pouco mais rígido.

Após o envelhecimento RTFO (Figura 4.26) as misturas ficaram mais rígidas, com parâmetros $G^*/\text{sen}\delta$ duas vezes mais elevados do que antes do procedimento. No entanto, todas as amostras apresentaram valores inferiores que a amostra de referência pós-RTFO. A diminuição da rigidez com o aumento da temperatura indica um aumento da resistência à fissuração por fadiga. Esses resultados são semelhantes aos encontrados por Chen (2014) e Maharaj (2015), quando utilizaram em suas pesquisas teores de óleo residual de fritura variando entre 2%, 4%, 6%, 8% e 10% de óleo residual de fritura ao CAP, e obtiveram diminuição de resistência $G^*/\text{sen}\delta$ com o aumento da temperatura e concentração de óleo. Os resultados obtidos são consistentes com os resultados de ponto de amolecimento e viscosidade Rotacional encontrados nesta pesquisa.

Figura 4.25 - Curvas do $G^*/\text{sen } \delta$ versus temperatura - CAP 50/70 (óleo de soja novo e residual)Figura 4.26 - Curvas do $G^*/\text{sen } \delta$ versus temperatura - CAP 50/70 - pós-RTFO (óleo de soja novo e residual)

A Figura 4.27 e 4.28 apresentam resultados do parâmetro $G^*/\text{sen } \delta$ em função da temperatura para o óleo de milho novo e residual, antes e pós envelhecimento em curto prazo, respectivamente. As amostras com adição dos teores de 1% e 2% do óleo novo e residual mostraram-se mais rígidas que a amostra de referência, sendo mais resistente à deformações permanentes. A resistência verificada com o parâmetro $G^*/\text{sen } \delta$ diminuiu com o aumento da temperatura e teor de óleo. Após o envelhecimento verificou-se que o parâmetro $G^*/\text{sen } \delta$ foi superior ao observado nas amostras antes do RTFO. Os parâmetros $G^*/\text{sen } \delta$ dos teores da pesquisa são

inferiores a amostra de referência. Contudo, observa-se que os valores do óleo de milho puro e residual estão muito próximos, não sendo verificada diferença significativa.

Figura 4.27 - Curvas do $G^*/\text{sen } \delta$ versus temperatura - CAP 50/70 (óleo de milho novo e residual)

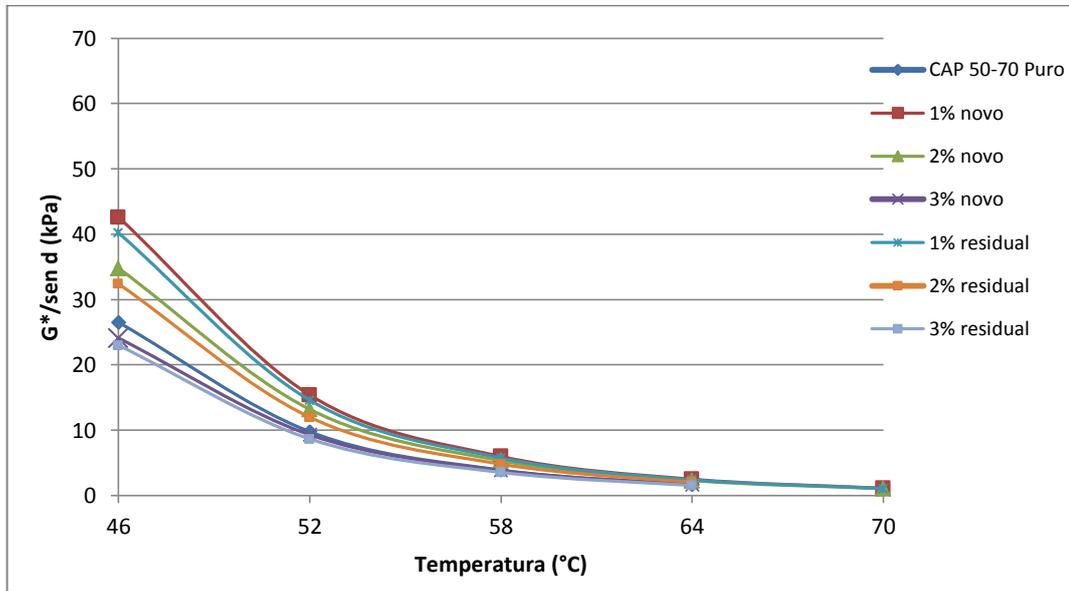
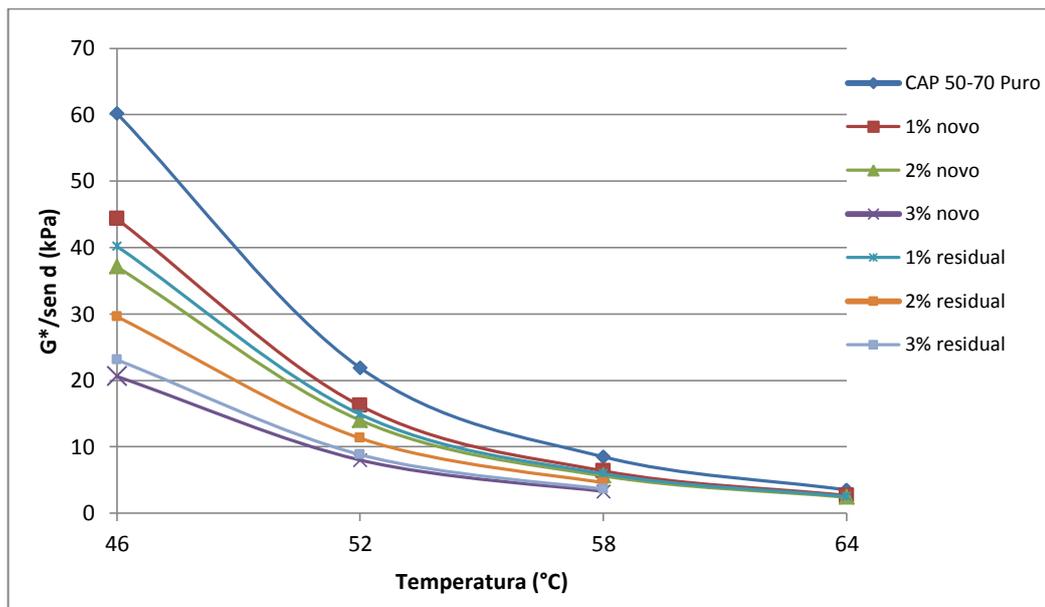


Figura 4.28 - Curvas do $G^*/\text{sen } \delta$ versus temperatura - CAP 50/70 - pós-RTFO (óleo de milho novo e residual)



Nas Figuras 4.29 e 4.30 verifica-se o parâmetro $G^*/\text{sen } \delta$ em função da temperatura, com a utilização do AMP 55/75 e óleo de soja novo e residual, antes e pós envelhecimento em curto prazo, respectivamente. A rigidez da mistura diminui gradualmente com a temperatura e o teor de óleo utilizado. Os teores de óleo de

soja novo e residual utilizado mantém uma proximidade de valores entre si, permanecendo uma diferença insignificante de $G^*/\text{sen } \delta$. Após o envelhecimento RTFO (Figura 4.30), verifica-se que as misturas se distanciam significativamente do AMP 55/75 Puro envelhecido, tornando-se muito menos resistente. Não existe diferença significativa entre o óleo de soja e de milho.

Figura 4.29 - Curvas do $G^*/\text{sen } \delta$ versus temperatura – AMP 55/75 (óleo de soja novo e residual)

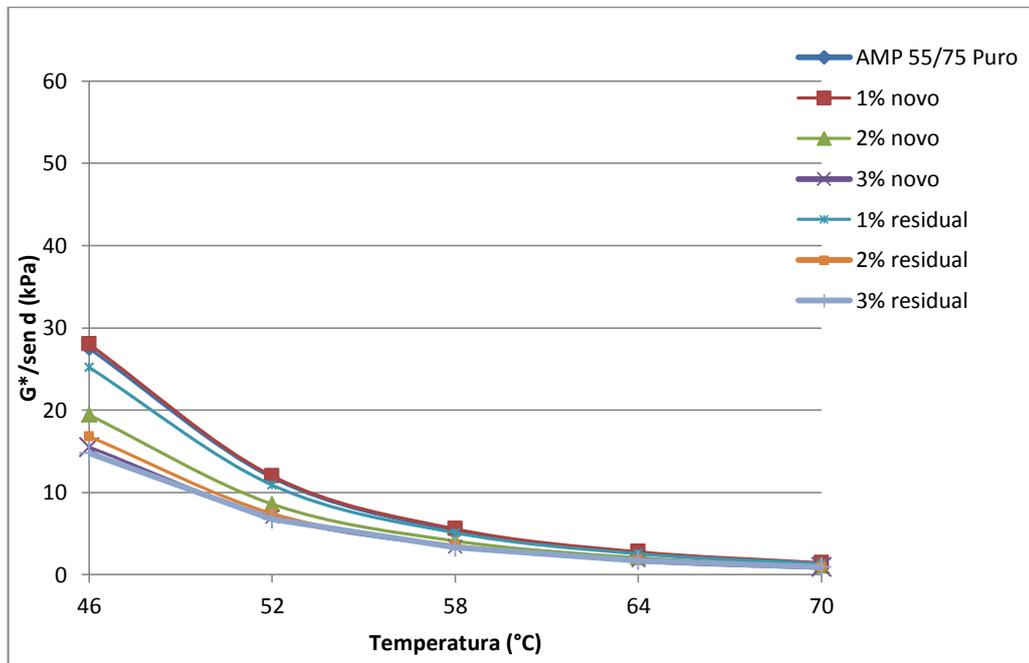
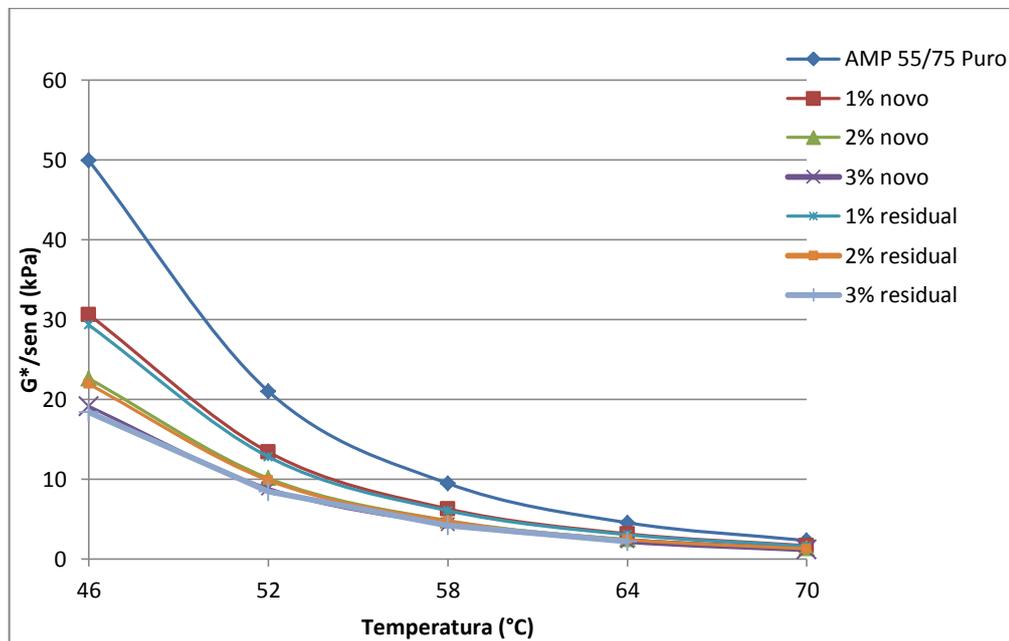


Figura 4.30 - Curvas do $G^*/\text{sen } \delta$ versus temperatura – AMP 55/75 - pós-RTFO (óleo de soja novo e residual)



Nas misturas executadas com AMP 55/75 e óleo de milho novo e residual (Figura 4.31) verifica-se que os valores da resistência se distanciam do AMP 55/75 Puro, tornando a rigidez menor. Os valores de $G^*/\sin \delta$ das misturas com óleo novo e residual são próximas, não havendo diferença significativa entre estes tipos de óleos. Nas mesmas condições, após o envelhecimento (Figura 4.32), a rigidez das misturas aumentou e se distanciou significativamente da amostra de referência. Os valores de $G^*/\sin \delta$ entre os teores de óleos de milho novo e residual foram similares e portanto não houve diferença significativa.

Figura 4.31 - Curvas do $G^*/\sin \delta$ versus temperaturas – AMP 55/75 (óleo de milho novo e residual)

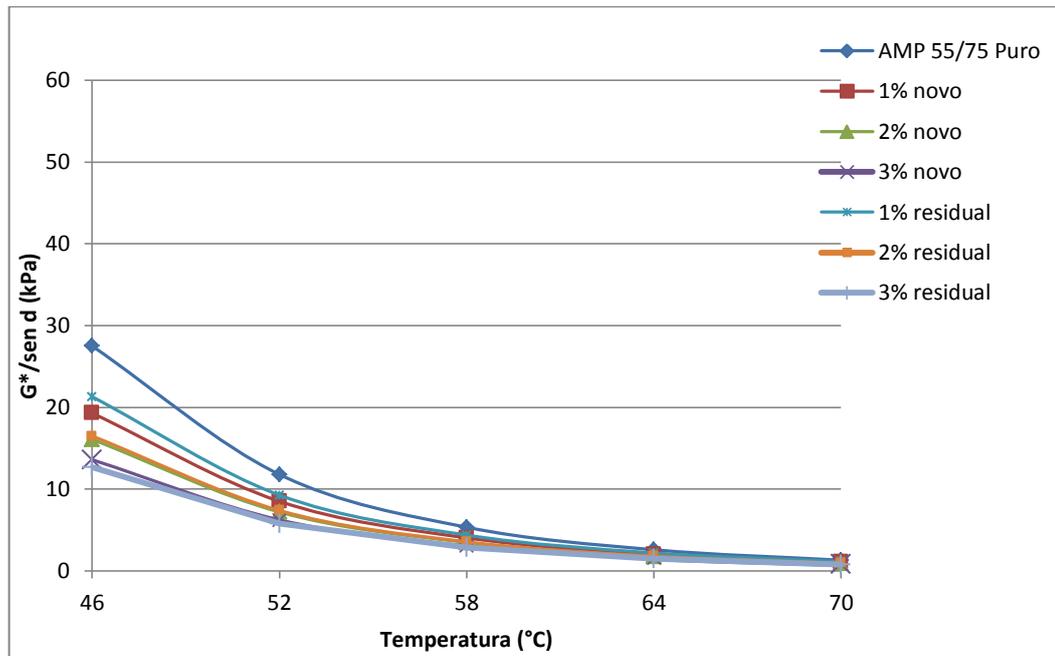
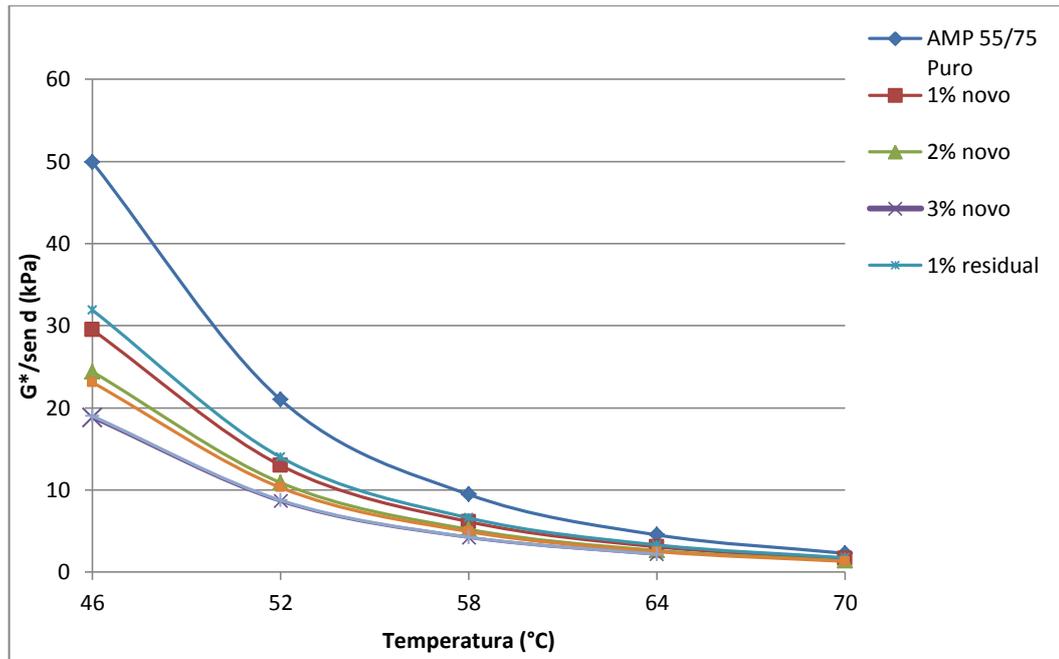


Figura 4.32 - Curvas do $G^*/\text{sen } \delta$ versus temperatura – AMP 55/75 - pós-RTFO (óleo de milho novo e residual)



Neste ensaio de PG observa-se que todas as misturas diminuem a rigidez quando é aumentada a temperatura e os teores de óleos utilizados na pesquisa, conseqüentemente diminuindo a viscosidade. Não foi observada alteração significativa da rigidez quando utilizados os óleos novos e residuais, seja com o CAP 50/70 ou AMP 55/75, contribuindo assim, para o emprego do óleo residual. Após o envelhecimento, todas as amostras aumentaram a rigidez em relação às amostras não envelhecidas. Quando se relaciona a resistência do CAP 50/70 com o AMP 55/75, verifica-se que aquele mostrou-se mais rígido pós-RTFO e este antes do RTFO. As pesquisas de Sun *et al* (2016) e Lucena *et al* (2016) corroboram com os resultados desta pesquisa, ou seja diminuição do parâmetro $G^*/\text{sen } \delta$ com o aumento da temperatura e teor de óleo.

O Grau de Desempenho do CAP obtido nas misturas desta pesquisa, indica que os mesmos possuem propriedades físicas adequadas para o emprego em campo.

4.3.2 Ensaio MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery)

A realização do ensaio MSCR possibilitou a avaliação do percentual de recuperação (%R - onde é fornecido dados da elasticidade), da compliância não-recuperável (J_{nr} - que apresenta dados da suscetibilidade ao acúmulo de deformação permanente) e a diferença percentual entre as compliâncias não-

recuperáveis ($J_{nr, diff}$ - a qual fornece dados quanto a sensibilidade ao aumento do nível de tensão). Os resultados deste ensaio estão resumidos na Tabela 4.11 onde verifica-se valores do percentual de recuperação (%R) e compliância não-recuperável (J_{nr}), para as tensões de 0,1 kPa e 3,2 kPa.

Os percentuais de recuperação à tensão de 3,2 kPa, quando utilizado o CAP 50/70 e temperatura de 64°C, foram inferiores aos obtidos com a tensão aplicada de 0,1 kPa. A compliância não-recuperável (J_{nr}) à tensão de 3,2 kPa apresentou valores superiores aos obtidos com a tensão aplicada de 0,1 kPa. Este comportamento era esperado pois o J_{nr} é dependente da temperatura e do nível de stress aplicado. Quando os valores de J_{nr} são avaliados na temperatura de 58°C, estes são mais baixos, variando de 2,41 kPa a 2,88 kPa com teores de 3% de óleo de soja e óleo de milho, novo e residual. Com o teor de 2% de óleo de milho residual o J_{nr} fica com o valor de 1,81 kPa.

Quando é empregado o AMP 55/75, os percentuais de recuperação diminuem à tensão de 3,2 kPa em relação à tensão de 0,1 kPa, com a temperatura de PG. O percentual de recuperação para a tensão de 3,2 kPa à temperatura de 58°C varia de 38,1% a 39,3%, considerando-se a temperatura de 64°C a variação é de 22,7% a 35,0%. Segundo Domingos (2011) estes valores elevados de (%R) para o AMP 55/75 pode indicar uma rede polimérica bem estabelecida no material, onde lhe confere respostas elásticas significativas aos carregamentos aplicados.

Tabela 4.10 - Tabela resumo do ensaio MSCR

Tipo	Teores	PG (°C)	R _{0.1} (%)	R _{3.2} (%)	R _{diff} (%)	J _{nr 0.1} (kPa)	J _{nr 3.2} (kPa)	J _{nr diff}
Puro	CAP 50/70	64,0	40,9	3,1	92,3	1,54	2,62	70,0
Óleo de soja novo	CAP 50/70 + 1%	64,0	23,8	1,0	95,6	2,69	3,52	36,2
	CAP 50/70 + 2%	64,0	28,1	0,8	97,0	2,69	4,13	53,5
	CAP 50/70 + 3%	58,0	18,1	3,9	78,5	2,38	2,88	21,0
Óleo de soja residual	CAP 50/70 + 1%	64,0	14,6	4,1	72,0	2,54	2,94	15,7
	CAP 50/70 + 2%	64,0	20,0	5,2	73,7	3,03	3,96	30,6
	CAP 50/70 + 3%	58,0	25,0	2,3	90,8	1,86	2,59	39,1
Óleo de milho novo	CAP 50/70 + 1%	64,0	20,7	1,2	94,0	2,64	3,63	37,4
	CAP 50/70 + 2%	64,0	37,3	2,7	92,8	2,29	4,05	77,3
	CAP 50/70 + 3%	58,0	30,3	4,2	86,3	1,59	2,41	52,0
Óleo de milho residual	CAP 50/70 + 1%	64,0	21,6	1,3	94,0	2,63	3,85	46,3
	CAP 50/70 + 2%	58,0	34,1	3,8	88,9	1,12	1,81	62,2
	CAP 50/70 + 3%	58,0	18,0	2,3	87,2	1,91	2,45	28,1
Puro	AMP 55/75	70,0	38,0	33,0	13,3	1,76	1,89	7,2
Óleo de soja novo	AMP 55/75 + 1%	64,0	42,3	32,3	23,5	1,33	1,64	23,9
	AMP 55/75 + 2%	64,0	44,1	28,0	36,6	1,52	2,27	49,6
	AMP 55/75 + 3%	64,0	44,8	30,9	31,1	1,86	2,48	33,3
Óleo de soja residual	AMP 55/75 + 1%	64,0	39,5	35,0	11,6	1,28	1,51	18,1
	AMP 55/75 + 2%	64,0	34,8	28,3	18,8	1,95	2,29	17,4
	AMP 55/75 + 3%	58,0	50,4	39,3	22,0	0,79	1,02	30,1
Óleo de milho novo	AMP 55/75 + 1%	64,0	28,4	22,7	20,2	1,49	1,94	29,6
	AMP 55/75 + 2%	64,0	33,8	29,1	13,8	1,57	1,93	23,4
	AMP 55/75 + 3%	58,0	54,0	38,1	29,3	0,78	1,14	46,3
Óleo de milho residual	AMP 55/75 + 1%	64,0	40,8	34,9	14,4	1,16	1,40	20,4
	AMP 55/75 + 2%	64,0	42,8	29,2	31,7	1,34	1,87	39,4
	AMP 55/75 + 3%	58,0	56,1	37,0	34,1	0,6	0,97	62,0

Segundo Domingos (2015) percentuais de recuperação maiores podem ser traduzidos como uma parcela maior de deformação recuperável em relação ao total sofrido pelo material após cada ciclo de fluência e de recuperação (o acúmulo de deformação plástica é menor), o que é favorável à resistência à deformação permanente. Quanto mais baixos forem os valores de J_{nr} , traduzem como uma suscetibilidade menor do CAP à deformação permanente em campo, ou seja, há um aumento da contribuição do CAP na resistência da mistura asfáltica à deformação permanente.

Na Figura 4.33 são apresentados os resultados do ensaio MSCR, onde pode-se verificar valores do comprimento de fluência não-recuperável (J_{nr}) e do percentual

de recuperação (%R) no emprego de óleo de soja novo e óleo de soja residual com o CAP 50/70, à tensão cisalhante de 0,1 kPa e 3,2 kPa, empregando-se a temperatura especificada para o PG, respectivamente. O J_{nr} aumentou quando a tensão cisalhante passou de 0,1 kPa para 3,2 kPa. Contudo, o (%R) diminuiu com a mesma mudança de tensão. Na Figura 4.34 apresenta os mesmos resultados para o óleo de milho novo e residual.

Figura 4.33 - (J_{nr}) e (%R) utilizando óleo de soja com CAP 50/70 a 0,1 kPa e 3,2 kPa.

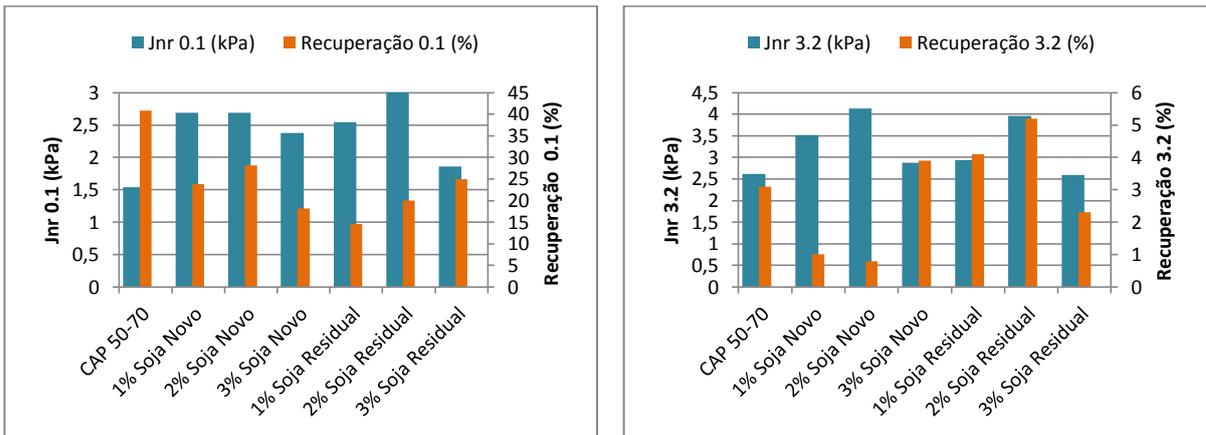
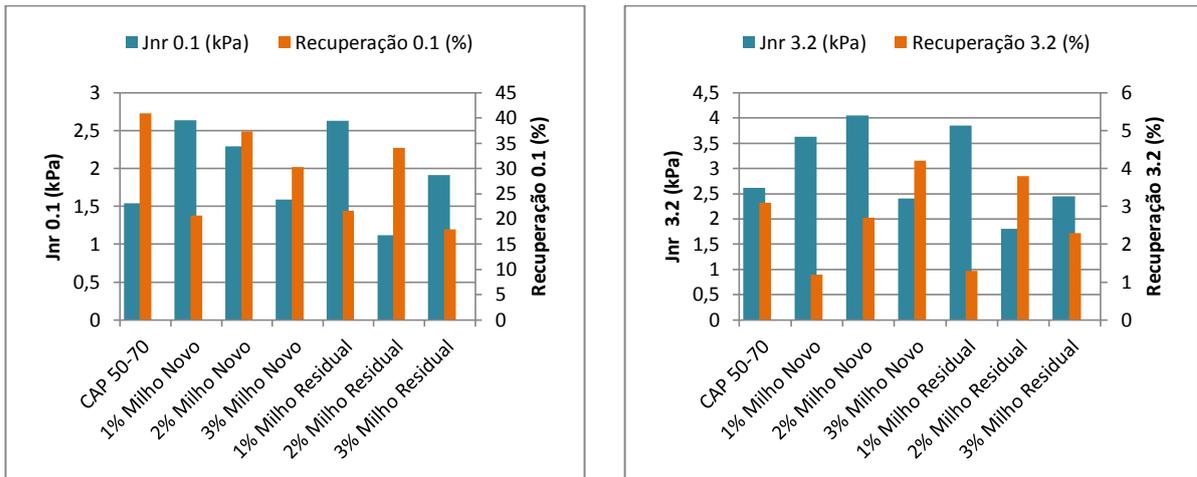


Figura 4.34 - (J_{nr}) e (%R) utilizando óleo de milho com CAP 50/70 a 0,1 kPa e 3,2 kPa



As Figuras 4.35 e 4.36 apresentam os resultados dos parâmetros supracitados com o emprego do AMP 55/75 e óleo de soja e óleo de milho, respectivamente. As misturas nas duas situações mostraram-se menos susceptíveis ao acúmulo de deformação plástica devido a valores menores de (J_{nr}) em relação ao CAP 50/70, seja com tensão de 0,1 kPa ou 3,2 kPa. No entanto, nas mesmas

condições apresentaram maior capacidade de recuperar deformações por ter um (%R) maior.

Figura 4.35 - (J_{nr}) e (%R) utilizando óleo de soja com AMP 55/75 a 0,1 kPa e 3,2 kPa

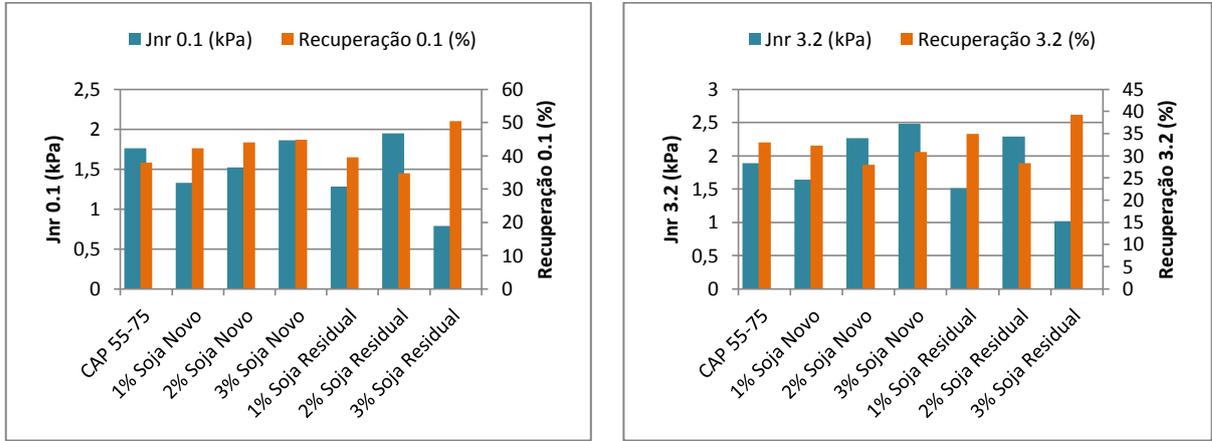
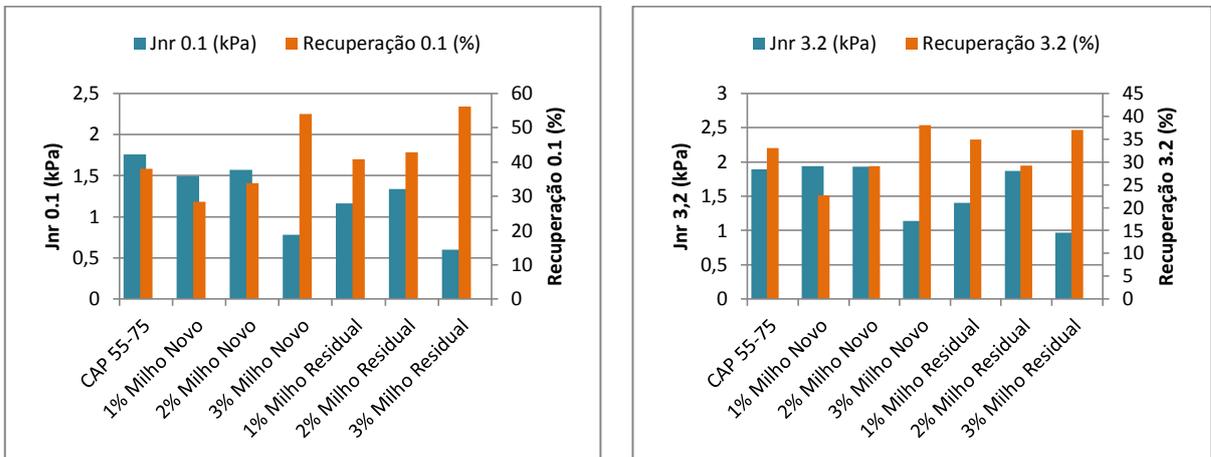


Figura 4.36 - (J_{nr}) e (%R) utilizando óleo de milho com AMP 55/75 a 0,1 kPa e 3,2 kPa



Segundo Anderson *et al* (2010) o valor de $J_{nr, diff}$, que corresponde a diferença do $J_{nr, 0.1}$ e $J_{nr, 3.2}$, não deve exceder a 75%, para que o CAP não seja excessivamente sensível à variação do nível de tensão. Na Figura 4.37 verifica-se que apenas o CAP 50/70 modificado com teor de 2% de óleo de milho novo à temperatura de 64°C, ultrapassou os 75%, o que denota ser uma mistura sensível a variação do nível de tensão aplicada. No entanto na Figura 4.38 verifica-se que nas amostras trabalhadas com o AMP 55/75, o $J_{nr, diff}$ se manteve abaixo de 75%, fato esperado em função do aditivo polimérico.

Figura 4.37 - Percentual de Compliância não-recuperável CAP 50/70

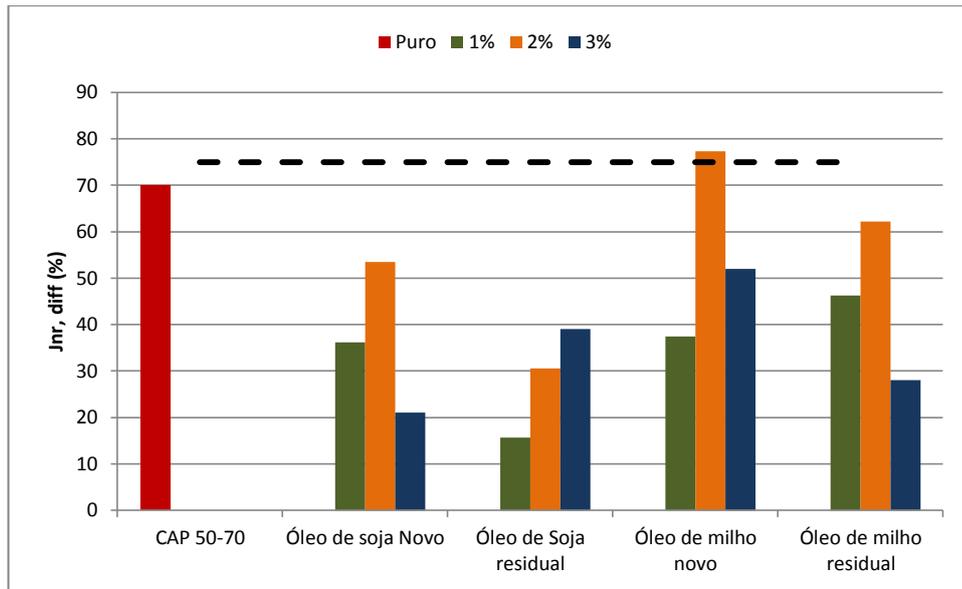
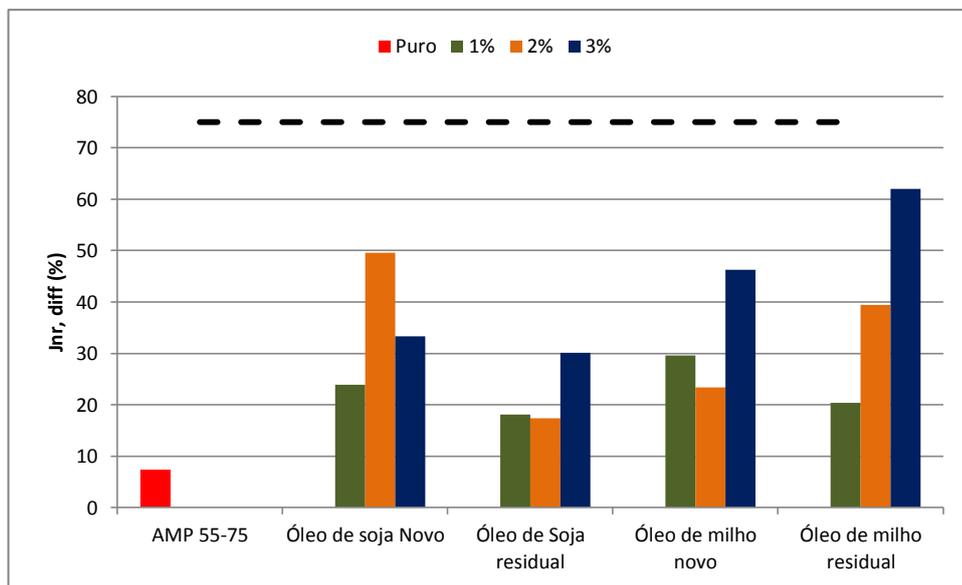


Figura 4.38 - Percentual de Compliância não-recuperável AMP 55/75



A Tabela 4.11 apresenta os níveis de tráfego obtidos em função do J_{nr} . Observa-se que os teores de óleo de soja e de milho misturados ao CAP 50/70, apresentam a classificação “Padrão (S)” na maioria das amostras, não tendo diferença quanto ao CAP 50/70 Puro. Apenas o teor de 2% de óleo de milho residual apresentou a classificação “Pesado(H)”. Os teores de 2% de soja novo e óleo de milho novo, ficaram com valores de J_{nr} acima do valor máximo, não sendo classificado quanto ao nível de tráfego para o PG em questão.

Ainda na Tabela 4.11 verifica-se que o AMP 55/75 Puro apresenta a classificação “Pesado(H)”. Os teores de óleo de soja e óleo de milho misturados ao AMP 55/75, quando os teores são de 1% de óleo de soja novo e óleo de soja residual, permanecem com a mesma classificação do AMP 55/75 Puro. Com os percentuais de 2% e 3% destes mesmos óleos, os valores J_{nr} aumentam, levando o nível de tráfego para “Padrão(S)”.

Tabela 4.11 - Nível de tráfego obtido em função do J_{nr}

Tipo	Teores	PG (°C)	J_{nr} 3.2 (kPa)	Intervalo J_{nr} (kPa^{-1})	Nível de tráfego
Puro	CAP 50/70	64,0	2,62	$2,0 \leq J_{nr} \leq 4,0$	Padrão (S)
Óleo de soja novo	CAP 50/70 + 1%	64,0	3,52	$2,0 \leq J_{nr} \leq 4,0$	Padrão (S)
	CAP 50/70 + 2%	64,0	4,13	-	
	CAP 50/70 + 3%	58,0	2,88	$2,0 \leq J_{nr} \leq 4,0$	Padrão (S)
Óleo de soja residual	CAP 50/70 + 1%	64,0	2,94	$2,0 \leq J_{nr} \leq 4,0$	Padrão (S)
	CAP 50/70 + 2%	64,0	3,96	$2,0 \leq J_{nr} \leq 4,0$	Padrão (S)
	CAP 50/70 + 3%	58,0	2,59	$2,0 \leq J_{nr} \leq 4,0$	Padrão (S)
Óleo de milho novo	CAP 50/70 + 1%	64,0	3,63	$2,0 \leq J_{nr} \leq 4,0$	Padrão (S)
	CAP 50/70 + 2%	64,0	4,05	-	
	CAP 50/70 + 3%	58,0	2,41	$2,0 \leq J_{nr} \leq 4,0$	Padrão (S)
Óleo de milho residual	CAP 50/70 + 1%	64,0	3,85	$2,0 \leq J_{nr} \leq 4,0$	Padrão (S)
	CAP 50/70 + 2%	58,0	1,81	$1,0 \leq J_{nr} \leq 2,0$	Pesado (H)
	CAP 50/70 + 3%	58,0	2,45	$2,0 \leq J_{nr} \leq 4,0$	Padrão (S)
Puro	AMP 55/75	70,0	1,89	$1,0 \leq J_{nr} \leq 2,0$	Pesado (H)
Óleo de soja novo	AMP 55/75 + 1%	64,0	1,64	$1,0 \leq J_{nr} \leq 2,0$	Pesado (H)
	AMP 55/75 + 2%	64,0	2,27	$2,0 \leq J_{nr} \leq 4,0$	Padrão (S)
	AMP 55/75 + 3%	64,0	2,48	$2,0 \leq J_{nr} \leq 4,0$	Padrão (S)
Óleo de soja residual	AMP 55/75 + 1%	64,0	1,51	$1,0 \leq J_{nr} \leq 2,0$	Pesado (H)
	AMP 55/75 + 2%	64,0	2,29	$2,0 \leq J_{nr} \leq 4,0$	Padrão (S)
	AMP 55/75 + 3%	58,0	1,02	$1,0 \leq J_{nr} \leq 2,0$	Pesado (H)
Óleo de milho novo	AMP 55/75 + 1%	64,0	1,94	$1,0 \leq J_{nr} \leq 2,0$	Pesado (H)
	AMP 55/75 + 2%	64,0	1,93	$1,0 \leq J_{nr} \leq 2,0$	Pesado (H)
	AMP 55/75 + 3%	58,0	1,14	$1,0 \leq J_{nr} \leq 2,0$	Pesado (H)
Óleo de milho residual	AMP 55/75 + 1%	64,0	1,40	$1,0 \leq J_{nr} \leq 2,0$	Pesado (H)
	AMP 55/75 + 2%	64,0	1,87	$1,0 \leq J_{nr} \leq 2,0$	Pesado (H)
	AMP 55/75 + 3%	58,0	0,97	$0,5 \leq J_{nr} \leq 1,0$	Muito pesado (E)

4.3.3 Ensaios Reológicos no Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR)

- Monitoramento do (G^*) e da ($\tan \delta$) em Varredura de Temperatura

Nas Figuras 4.39 a 4.46 são apresentadas as variações do módulo complexo (G^*) e da tangente do ângulo de fase ($\text{Tan } \delta$) em função das temperaturas de ensaio.

Na Figura 4.39 observa-se os resultados para o CAP 50/70 com teores de óleo de soja antes do envelhecimento a curto prazo. O G^* diminui com o aumento da temperatura e o teor de óleo empregado na pesquisa. O parâmetro $\text{Tan } \delta$, com a mistura de 3% de óleo de soja novo e residual, foi superior a amostra de referência.

Na Figura 4.40, após o envelhecimento em curto prazo, o G^* manteve-se com o mesmo comportamento das misturas antes do envelhecimento, contudo a $\text{Tan } \delta$ com 2% e 3% de óleo de soja novo e residual foi superior ao CAP puro, e com 1% de óleo de soja a $\text{Tan } \delta$ ficou abaixo deste.

Segundo Chen *et al* (2014b) o ângulo de fase na estrutura do CAP é mais sensível a agentes químicos e físicos. Um menor ângulo de fase tem melhor desempenho na recuperação elástica do CAP. Os baixos valores do ângulo de fase das misturas da pesquisa indicam melhor recuperação elástica em relação ao CAP referência. Diante dos resultados verifica-se que devido ao aumento do ângulo de fase e adição elevados teores de óleo de soja (3%) poderiam reduzir sensivelmente a recuperação elástica do CAP.

O G^* diminui proporcionalmente à adição de óleo e aumento da temperatura, este fato implica na redução da resistência à deformação do CAP.

Figura 4.39 - Variação de G^* e $\text{Tan } \delta$ versus temperatura (CAP 50/70 / óleo de soja)

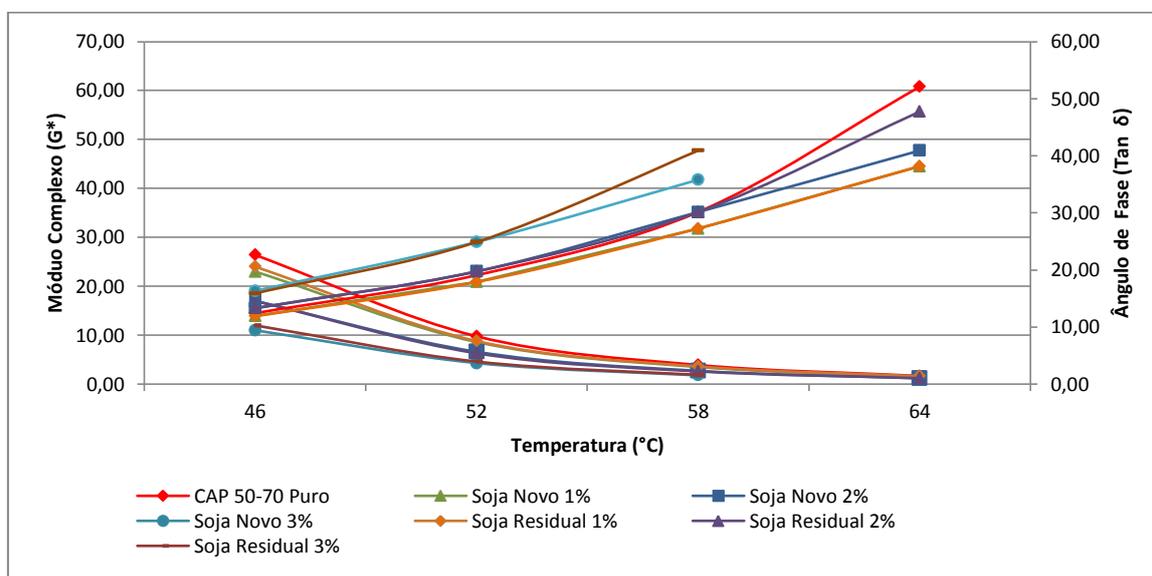
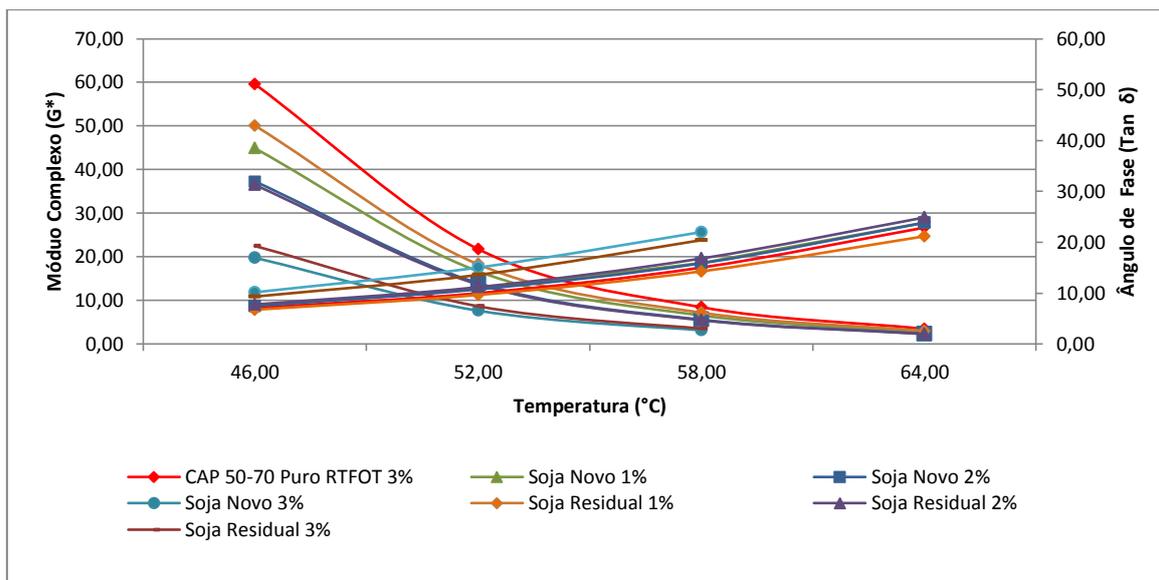
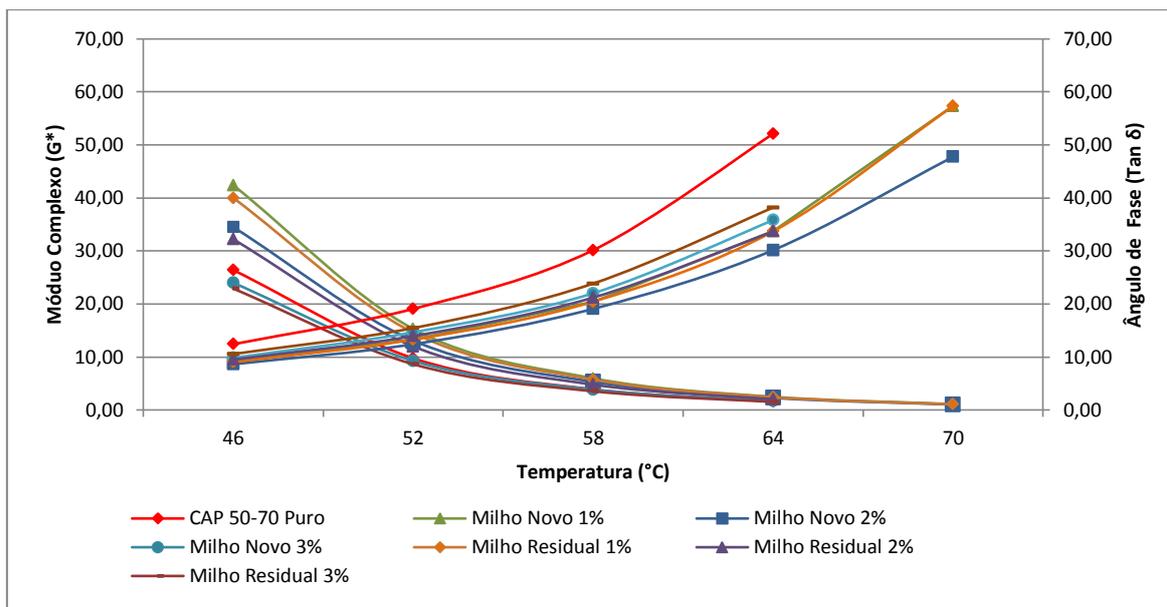
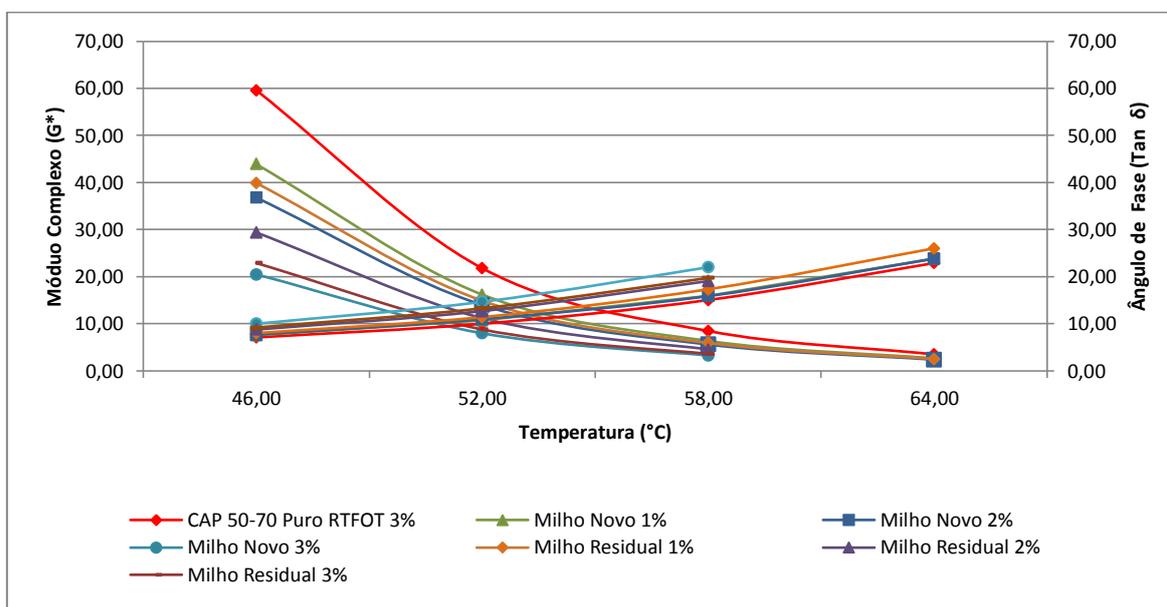


Figura 4.40 - Variação de G^* e $\text{Tan } \delta$ versus temperatura (CAP 50/70 / óleo de soja pós-RTFO)

As Figuras 4.41 e 4.42 apresentam as variações do G^* e da $\text{Tan } \delta$ em função das temperaturas de ensaio, para as amostras com óleo de milho novo e residual, antes e após RTFO, respectivamente.

Na Figura 4.41 o G^* diminuiu com o aumento da temperatura e o teor de óleo empregado na pesquisa. Os teores de 1% e 2% de óleo de milho (novo e residual) estão acima do CAP referência, indicando ganho de rigidez. A $\text{Tan } \delta$ de todas as misturas ficou com valores abaixo do CAP referência. Na Figura 4.42 após o envelhecimento em curto prazo o G^* do CAP referência ficou com valor superior as amostras modificadas e a $\text{Tan } \delta$ do CAP referência com valor menor que as amostras.

O aumento da $\text{Tan } \delta$ com o aumento da temperatura indica a perda gradativa da elasticidade do material. Por outro lado, a diminuição do G^* com o aumento da temperatura implica redução da resistência à deformação do CAP.

Figura 4.41 - Variação de G^* e $\text{Tan } \delta$ versus temperatura (CAP 50/70 / óleo de milho)Figura 4.42 - Variação de G^* e $\text{Tan } \delta$ versus temperatura (CAP 50/70 / óleo de milho pós-RTFO)

As Figuras 4.43 e 4.44 apresenta a variação do G^* e $\text{Tan } \delta$ versus a temperatura, para as misturas com o AMP 55/75 e óleo de soja, antes e após RTFO, respectivamente.

Na Figura 4.43 o G^* diminui de acordo com o aumento da temperatura e do teor de óleo. A adição de óleo ao AMP 55/75 leva a uma redução dos valores do G^* tendo em vista o efeito plastificante. Os valores do G^* das misturas ficaram abaixo

do CAP referência, reduzindo a resistência à deformação, tanto antes como após o envelhecimento a curto prazo. A $Tan \delta$ das misturas foi inferior ao CAP referência, indicando melhor recuperação elástica. Após o envelhecimento os teores de 1% e 2% de óleo de soja novo e residual elevaram os valores e ficaram acima do CAP referência, indicando baixa recuperação elástica.

Segundo Fernandes (2009) a $Tan \delta$ representa a razão entre G''/G' e uma redução desta indica uma maior elasticidade do AMP com polímero ou maior módulo elástico, ou seja, há melhora nas propriedades elásticas do asfalto. Nas amostras com AMP 55/75 desta pesquisa observa-se uma redução e variações equivalentes da $Tan \delta$, o que demonstra uma menor suscetibilidade térmica do AMP 55/75 em relação CAP 50/70, tendo em vista a formação de uma rede polimérica dentro da massa asfáltica.

Segundo Bahia et al (1995) um material com maior maciez e mais elástico será mais favorável para resistir a danos por fadiga, porque a tensão desenvolvida para uma dada deformação é menor e o asfalto será mais capaz de recuperar a sua condição de pré-carga.

Figura 4.43 - Variação de G^* e $Tan \delta$ versus temperatura (AMP 55/75 - óleo de soja)

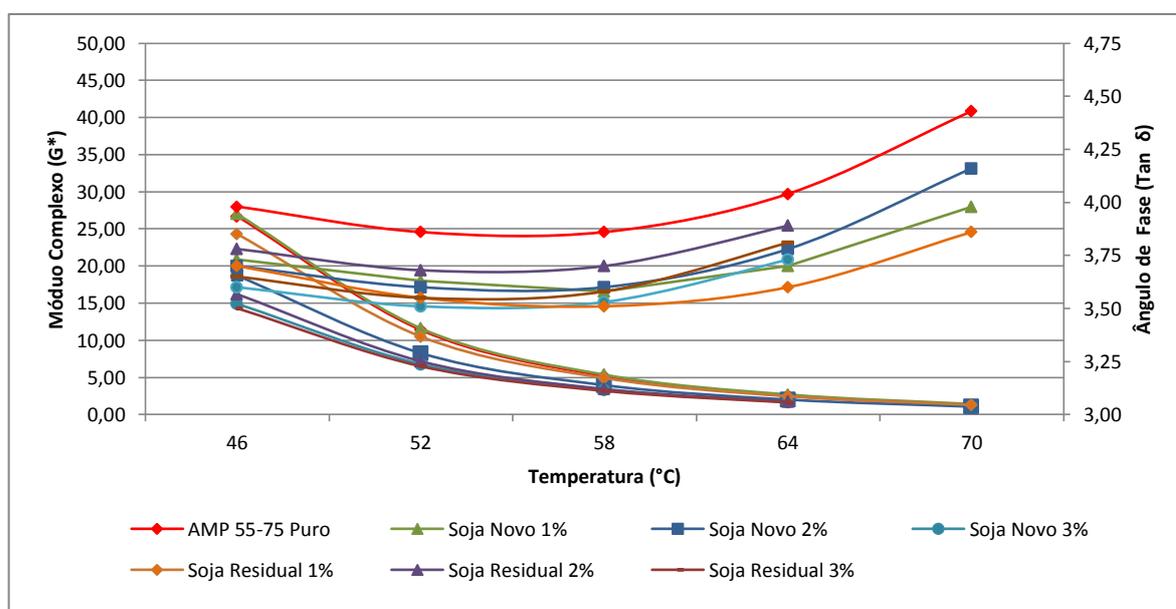
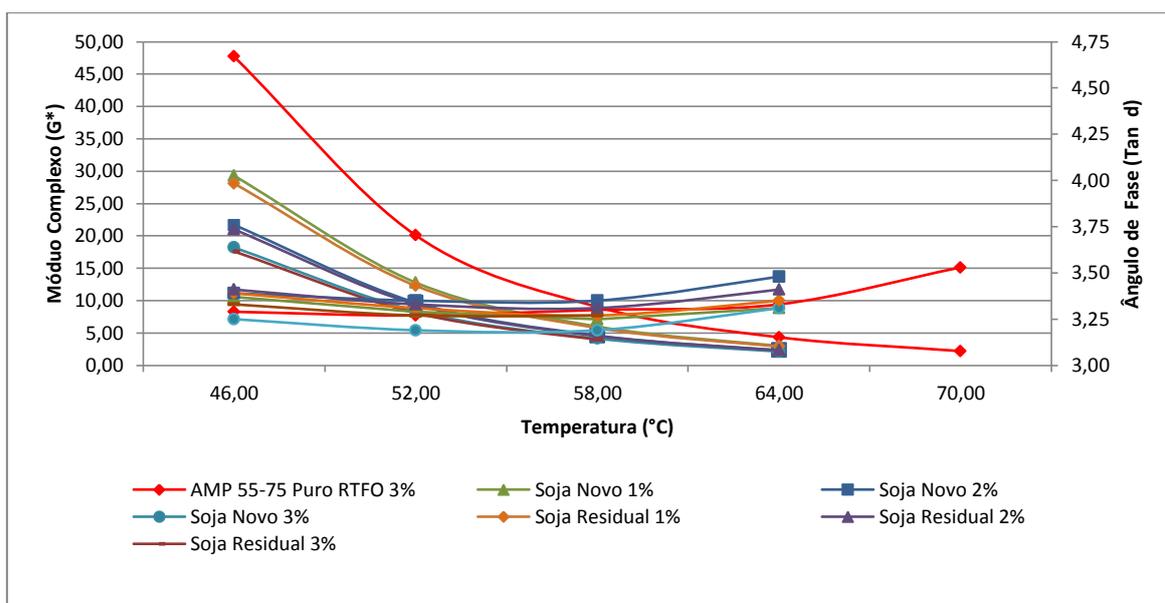


Figura 4.44 - Variação de G^* e $\text{Tan } \delta$ versus temperatura (AMP 55/75 / óleo de soja pós-RTFO)

Nas Figuras 4.45 e 4.46 verifica-se a variação do G^* e $\text{Tan } \delta$ em função da temperatura, quando utilizado AMP 55/75 e óleo de milho. Não foi observado diferença significativa entre o comportamento do óleo de milho e o óleo de soja.

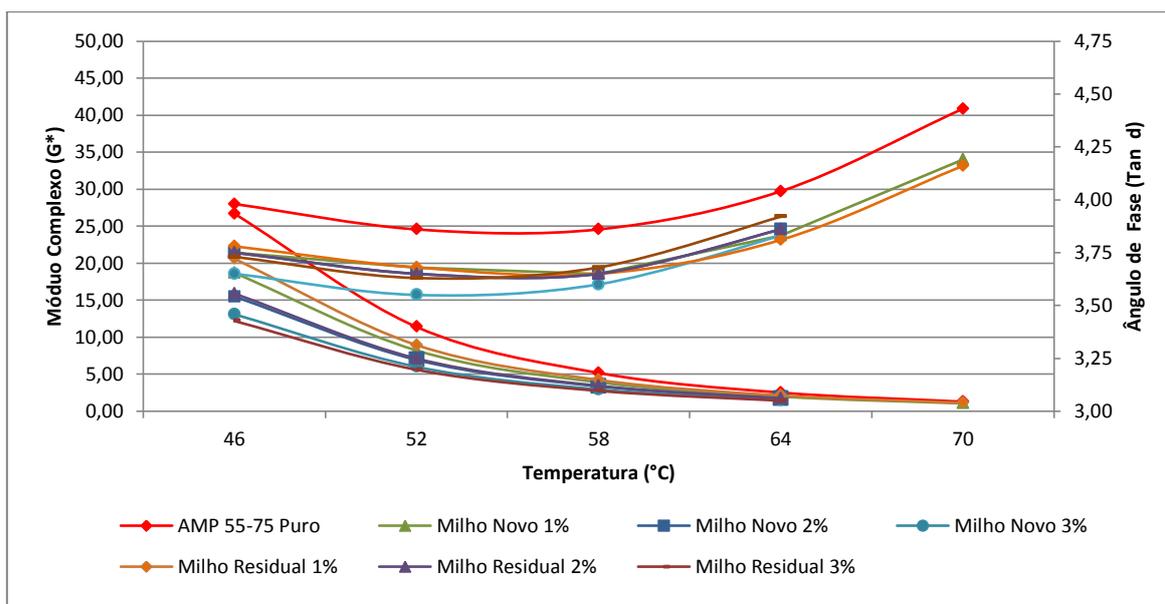
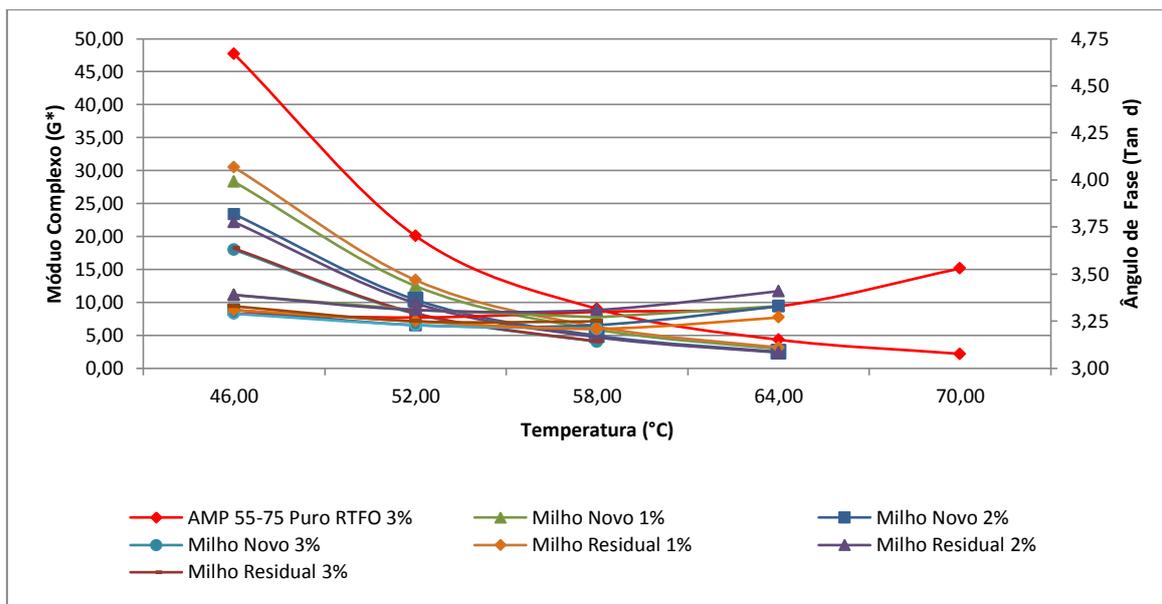
Figura 4.45 - Variação de G^* e $\text{Tan } \delta$ versus temperatura (AMP 55/75 - óleo de milho)

Figura 4.46 - Variação de G^* e $\tan \delta$ versus temperatura (AMP 55/75 / óleo de milho pós-RTFO)

Diante dos resultados apresentados verifica-se que o óleo de soja e óleo de milho influenciam o módulo complexo e o ângulo de fase do CAP. O aumento do teor de óleo e da temperatura irá reduzir o módulo complexo e aumentar o ângulo de fase. Em consequência, a adição de óleo em teores elevados irá reduzir a resistência à deformação do CAP e terá uma recuperação elástica prejudicada.

A literatura apresenta resultados semelhantes ao comportamento do G^* e $\tan \delta$ encontrados nesta pesquisa. Chen *et al* (2014a) verificou que o ângulo de fase geralmente aumenta com o aumento do teor de óleo e da temperatura e o módulo complexo diminui nas mesmas condições.

Os resultados deste ensaio estão de acordo com o ensaio de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade rotacional onde a rigidez diminuiu com o aumento do teor de óleo utilizado.

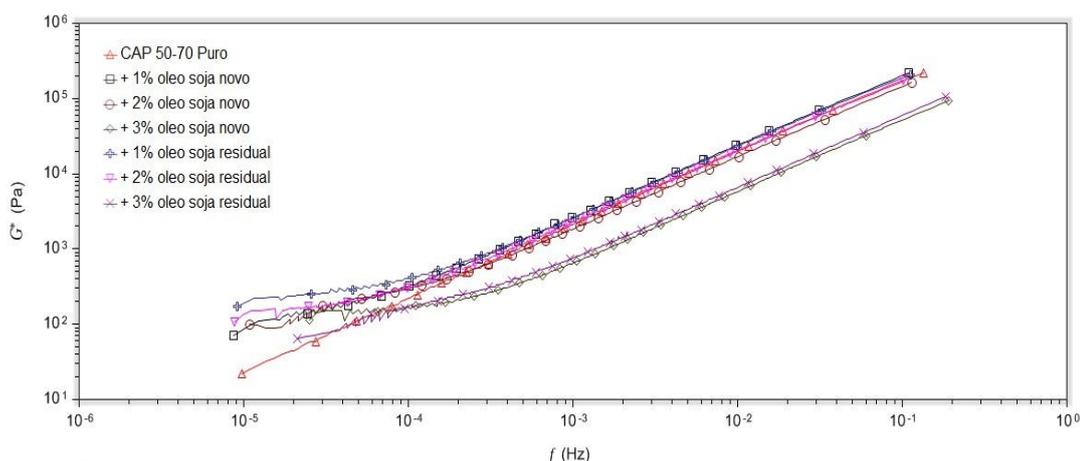
Não foi observada diferença significativa quanto a utilização do óleo de soja e óleo de milho (novo e residual), o que pode contribuir para diminuição dos custos quando empregado o óleo residual.

b. Monitoramento do (G^*) e da $\tan \delta$ em Varredura de Frequência

Nas Figuras 4.47 e 4.48 são apresentados os resultados do módulo complexo (G^*) e ângulo de fase (δ°) em função da varredura de frequência, para o CAP 50/70 e óleo de soja.

Na Figura 4.47 observa-se uma diminuição da rigidez e resistência à deformação das misturas com o aumento da temperatura e diminuição da frequência. O G^* das misturas diminui com o aumento do teor de óleo empregado, ficando levemente abaixo do CAP referência, à exceção da mistura com 1% de óleo de soja onde obteve um valor superior ao CAP referência. Em altas temperaturas e baixa frequência o G^* apresentou inconsistências tendo sido observados valores superiores ao CAP referência, podendo ter ocorrido o descolamento da amostra durante o ensaio.

Figura 4.47 - Curva Mestre G^* em varredura de frequência (CAP 50/70 / Óleo de soja)



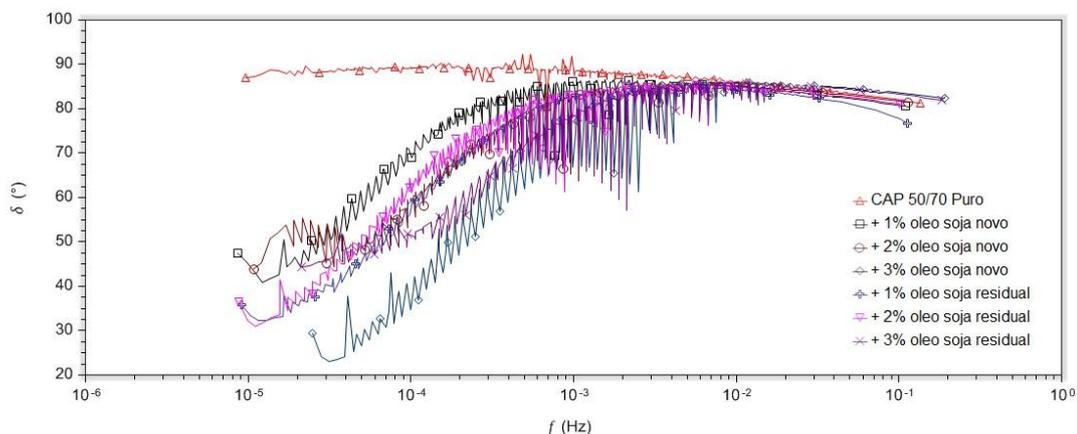
Na Figura 4.48 verifica-se o ângulo de fase (δ°) aumenta até a frequência intermediária. A inclinação é mais acentuada com teores maiores de óleo de soja, traduzindo uma maior susceptibilidade térmica com altas temperaturas e baixa frequência. O aumento do teor de óleo diminui o (δ°) e consequentemente aumenta a elasticidade e a capacidade de armazenar energia.

Com o aumento da frequência e diminuição da temperatura, observa-se que a variação de (δ°) torna-se insignificante quando comparada com a dissipada em forma de calor, fazendo com que as misturas estejam mais viscosas.

A adição de óleo de soja interferiu no comportamento reológico do CAP referência, haja vista ter elevado a resposta elástica com o aumento da temperatura e teor de óleo e diminuição da frequência.

Este resultado corrobora com o ensaio de MSCR onde o nível de tráfego aumenta com a diminuição da temperatura e teor de óleo, diminuindo a susceptibilidade ao acúmulo de deformação permanente.

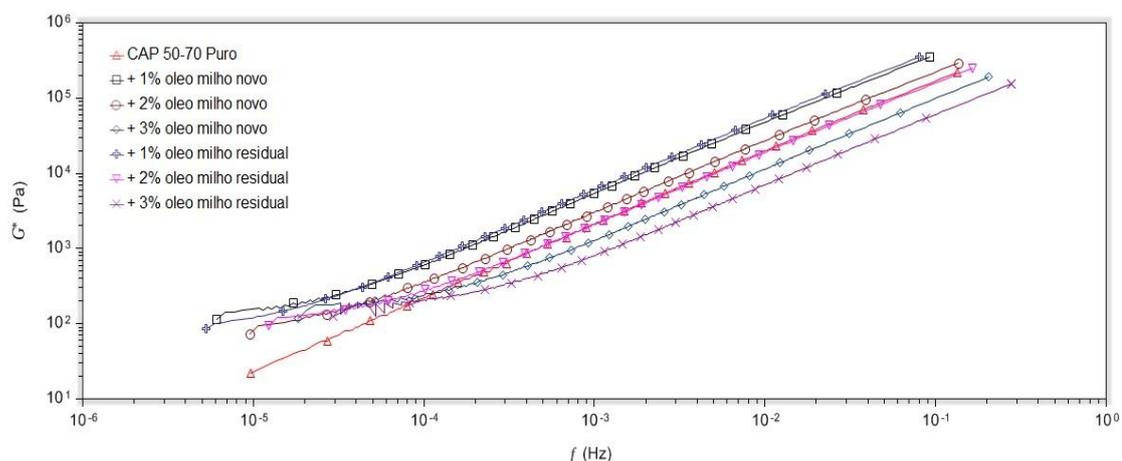
Figura 4.48 - Curva Mestre $\delta(^{\circ})$ em varredura de frequência (CAP 50/70 - Óleo de soja)



Nas Figuras 4.49 e 4.50 são apresentados os resultados do módulo complexo (G^*) e ângulo de fase (δ°) em função da varredura de frequência, para o CAP 50/70 e óleo de milho.

Não foi observada diferença significativa no emprego do óleo de milho em relação ao óleo de soja. No entanto, as misturas com 1% e 2% de óleo de milho apresentaram uma maior rigidez com valores maiores de G^* em relação ao CAP referência (Figura 4.49).

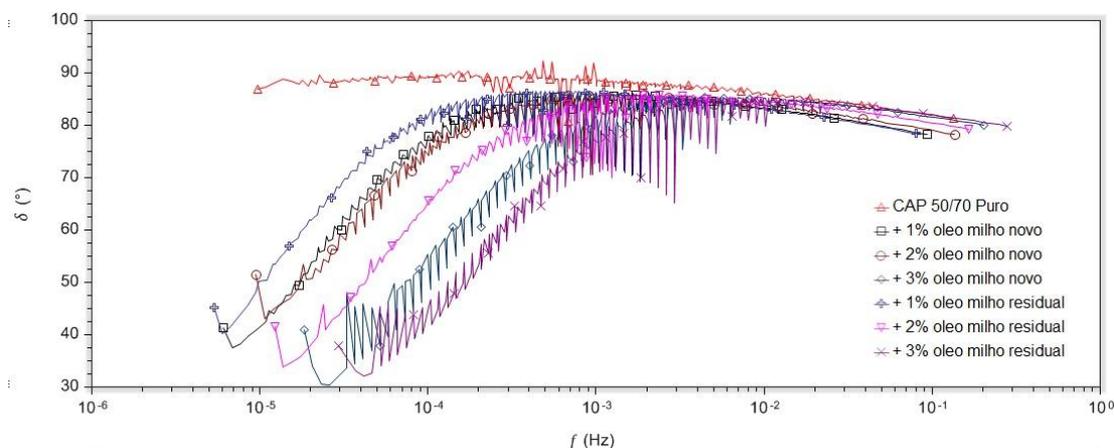
Figura 4.49 - Curva Mestre G^* em varredura de frequência (CAP 50/70 / Óleo de milho)



Na Figura 4.50 o (δ°) com o óleo de milho apresentou o mesmo comportamento do óleo de soja, com valores menores com o aumento do teor de

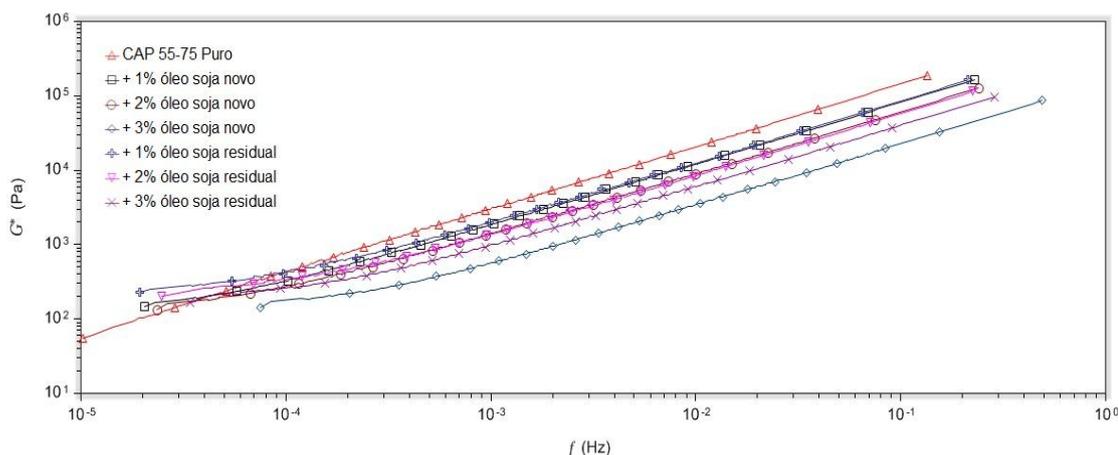
óleo e curvas acentuadas a altas temperaturas e baixa frequência. Apresentando maior susceptibilidade térmica.

Figura 4.50 - Curva Mestre $\delta(^{\circ})$ em varredura de frequência (CAP 50/70 - Óleo de milho)



Nas Figuras 4.51 e 4.52 são apresentados os resultados do módulo complexo (G^*) e ângulo de fase (δ°) em função da varredura de frequência, para o AMP 55/75 e óleo de soja.

Assim como o CAP 50/70, o AMP 55/75 apresenta uma diminuição da rigidez e resistência à deformação das misturas com o aumento da temperatura e diminuição da frequência. O G^* das misturas diminuem com o aumento do teor de óleo empregado, ficando todas as misturas abaixo do CAP referência. Em altas temperaturas e baixa frequência o G^* apresentou inconsistências tendo sido observados valores superiores ao CAP referência, excetuando-se o teor de 3% de óleo de soja novo que ficou abaixo.

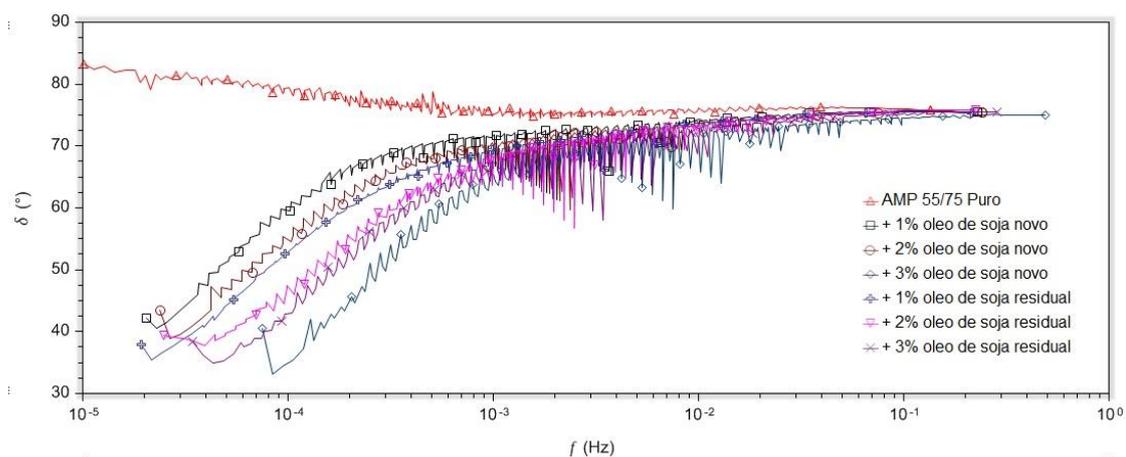
Figura 4.51 – Curva Mestre G^* em varredura de frequência (AMP 55/75 / Óleo de soja)

Na Figura 4.52 verifica-se o ângulo de fase (δ°) aumenta até a frequência intermediária. A inclinação é mais acentuada com teores maiores de óleo de soja, traduzindo uma maior susceptibilidade térmica com altas temperaturas e baixa frequência. O aumento do teor de óleo diminui o (δ°) e conseqüentemente aumenta a elasticidade e a capacidade de armazenar energia.

O AMP 55/75 aumentou a elasticidade, no entanto foi menos sensível que o CAP 50/70, tendo em vista ter apresentado menor inclinação das curvas, sendo assim menos susceptível à variação de temperatura.

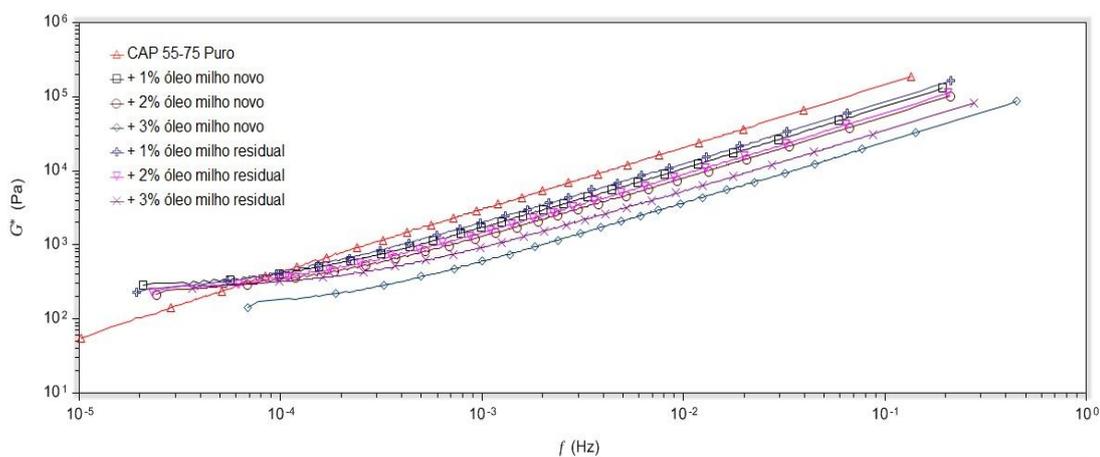
Segundo Fernandes (2009) a adição de óleo ao CAP modificado com SBS proporciona uma melhor dispersão do polímero na matriz asfáltica e permite um maior inchamento do elastômero termoplástico e a ampliação da rede polimérica, com a conseqüente diminuição do (δ°). Este efeito do óleo reduz a viscosidade do CAP e permite uma maior atuação da rede polimérica no CAP.

Figura 4.52 - Curva Mestre $\delta(^{\circ})$ em varredura de frequência (AMP 55/75 - Óleo de soja)

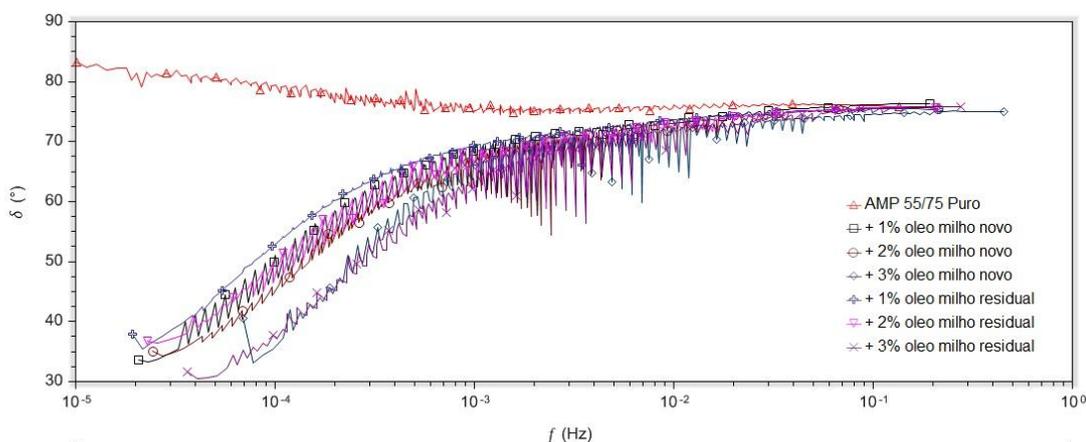


Na Figura 4.53 verifica-se que o comportamento assemelha-se ao do óleo de soja com AMP 55/75, não tendo variações significativas.

Figura 4.53 - Curva Mestre G^* em varredura de frequência (AMP 55/75 / Óleo de milho)



Na Figura 4.54 apresenta (δ°) em função da frequência com o emprego do óleo de milho. As misturas com óleo de milho apresentou curvas mais suaves à baixa frequência e altas temperaturas, refletindo em menor susceptibilidade térmica em relação ao emprego do óleo de soja.

Figura 4.54 - Curva Mestra $\delta(^{\circ})$ em varredura de frequência (AMP 55/75 - Óleo de milho)

As misturas desta pesquisa apresentaram um comportamento reológico típico, caracterizado pelo aumento da rigidez com o aumento da frequência de carregamento.

O aumento dos teores de óleo de soja e óleo de milho aumentam a elasticidade e diminuem a rigidez com o elevação da temperatura e diminuição da frequência, tanto para o AMP 55/75 como no CAP 50/70. A inclinação das curvas G^* e (δ°) das misturas quando empregado o AMP 55/75 mostram-se mais suaves em comparação daquelas apresentadas pelo CAP 50/70. O AMP 55/75 referência e as misturas com 1% e 2% de óleo de soja e milho, apresentaram um G^* maior, o que contribui para o aumento da resistência à deformação permanente. O (δ°) nas misturas com o AMP 55/75 apresentou menor susceptibilidade térmica.

4.4 Considerações Finais

Diante dos resultados dos ensaios apresentados neste Capítulo, verifica-se que a utilização de óleo de soja e óleo de milho (novo e residual) contribui de forma positiva para a diminuição da viscosidade do CAP com conseqüente diminuição da temperatura de usinagem e compactação das misturas estudadas.

Os teores ótimos a serem empregados nas misturas devem ser melhor estudados para que o teor de óleo não comprometa o comportamento das misturas quando empregada em campo. Observa-se poucas diferenças no emprego do óleo novo ou residual, não sendo passíveis de mudanças significativas na estrutura do CAP, ficando conclusivamente viável a utilização do óleo residual.

Os resultados indicam que o teor ótimo do óleo a ser empregado está no intervalo entre 1% e 2%, independente de novo ou residual.

Na varredura de temperatura, verifica-se que o AMP 55/75 apresentou um ângulo de fase menor em todas as misturas em comparação com o CAP50/70, tendo assim melhor recuperação elástica. Quando utilizado 1% e 2% de óleo de milho (novo e residual) a rigidez do CAP 50/70 ficou maior que o CAP puro.

Na varredura de frequência o AMP 55/75 não apresentou diferença quando utilizado óleo de soja ou de milho, estando o CAP puro com maior G^* e δ° . As misturas com o CAP 50/70 apresentaram maior rigidez com 1% de óleo de soja (novo e residual) e 1% e 2% de óleo de milho (novo e residual). A melhor resposta elástica foi obtida com 3% de óleo de soja e de milho (novo e residual).

Diante dos resultados verifica-se que os valores apontam o AMP 55/75 para o tráfego pesado, independente do tipo de óleo empregado nesta pesquisa, pela maior rigidez e melhor recuperação elástica, sendo menos susceptível a deformação permanente, causados pela alta frequência de cargas e tráfego.

CAPITULO 5

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 Conclusões

O estudo de misturas asfálticas mornas, produzidas com óleos de cozinha de soja e de milho, pode trazer benefícios ambientais e econômicos sem comprometer o desempenho mecânico das misturas asfálticas produzidas com estes aditivos.

Os ensaios de caracterização dos óleos mostraram que os óleos de milho, novo ou residual, são mais estáveis e menos viscosos e degradáveis termicamente que os óleos de soja. Após o processo de fritura foi verificado que não houve comprometimento significativo do óleo no estiramento carbonílicas, o que habilita a utilização dos óleos residuais sem comprometer as propriedades do CAP.

A adição dos óleos estudados, aos CAPs 50/70 e 55/75, proporcionou diminuição da rigidez destes com o aumento do teor de óleo utilizado. Entretanto, destaca-se que as misturas produzidas com o CAP 50/70 apresentaram maior susceptibilidade térmica do que as que utilizaram o AMP 55/75 como base.

Verificou-se que a resistência ao envelhecimento foi menor que aqueles não envelhecidos. Quando utilizado o CAP 50/70 com teor acima de 2% de óleo de milho foi obtido uma maior resistência ao envelhecimento que o CAP puro. Quando utilizado o AMP 55/75 as misturas não envelhecidas apresentaram-se mais resistentes que as envelhecidas, e a utilização de 3% de óleo de milho novo, mais resistente que o CAP puro.

O CAP 50/70 apresentou maior sensibilidade a adição dos óleos de soja e de milho, com variações significativas nas características de acordo com o aumento dos teores. A utilização dos óleos residuais apresentaram maiores reduções de viscosidade, embora o óleo de milho residual tenha maior estabilidade a variações de temperatura.

A adição dos óleos, aos CAPs, interfere diretamente na diminuição das temperaturas de usinagem e compactação das misturas asfálticas. A utilização do teor máximo estudado nesta pesquisa (3%) proporcionou uma diminuição de 7,7°C e 7,9°C para a mistura com óleo de soja novo, e 6,5°C e 6,7°C para a utilização de óleo de soja residual nas temperaturas de usinagem e compactação, respectivamente. O emprego do óleo de milho proporcionou a redução de

temperaturas de 7,8°C e 9,5°C, independente das condições dos óleos (novo ou residual).

Apesar das reduções das temperaturas serem inferiores a 10°C, isso não significa que é possível apenas essa redução, fato que impossibilita que estas misturas fossem enquadradas como Misturas Mornas. Quando trata-se de ativos, orgânicos e surfactantes, a redução das temperaturas de usinagem e compactação devem considerar não apenas os resultados dos ensaios de viscosidade, análise simplista, como também incluir estudos sobre a lubrificação da mistura. Os óleos agem na interface agregado-CAP, permitindo o correto cobrimento do agregado pelo filme de asfalto e promovendo uma melhor lubrificação da mistura, e conseqüentemente acréscimo de trabalhabilidade em temperaturas inferiores. Portanto, apesar da redução de temperatura, determinado por meio da viscosidade rotacional, ter sido de aproximadamente 5-10°C, acredita-se que esta é maior quando considerado o fenômeno supracitado. Para validação desta hipótese torna-se necessário a realização de ensaios físicos e mecânicos, com misturas produzidas com estes óleos, em temperaturas inferiores a determinada no ensaio de viscosidade.

Diante dos resultados desta pesquisa, pode-se concluir que a utilização dos óleos de soja e de milho (novo e residual) é viável do ponto de vista ambiental, físico e reológico. Destaca-se que o óleo residual apresenta maiores benefícios ambientais, tendo em vista os malefícios e problemas que o descarte incorreto pode acarretar ao meio-ambiente.

5.2 Sugestões para futuras pesquisas

De acordo com os resultados encontrados, e com a finalidade de aprofundamento desta pesquisa, são feitas as seguintes sugestões de estudo nesta área:

- a) estudar misturas asfálticas produzidas nos teores ótimos de óleo de soja e óleo de milho (novo e residual) e nas temperaturas determinadas no ensaio de viscosidade rotacional;

- b) avaliar misturas asfálticas, produzidas com a adição dos óleos de soja e de milho, em temperaturas inferiores as determinadas no ensaio de viscosidade rotacional;
- c) estudar o emprego do óleo residual de fritura bruto, ou seja sem separação dos constituintes (tipos de óleo);
- d) estudar da interação físico-química das propriedades do óleo residual de fritura com as propriedades do CAP;
- e) estudar a possibilidade de utilização do óleo de soja e de milho no RAP (Recycled asphalt pavement);

CAPÍTULO 6

6 REFERÊNCIAS

ABOISSA ÓLEOS VEGETAIS. **Óleo de milho: composição, processamento e utilização**. São Paulo, SP, 2013. Disponível em: < <http://http://www.aboissa.com.br/palestras.html>>. Acesso em: 03 maio 2016.

ALMEIDA, J. K. P.; NUNES, G. P.; TEIXEIRA, C. C. M.; RODRIGUES, D. P.; MELLO, J. R. **Caracterizações físico-químicas de óleos vegetais utilizados para produção de biodiesel com metodologias alternativas simples**. In: XXXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Belo Horizonte. 2011.

ALMEIDA JÚNIOR, A. F. **Reaproveitamento de pneus inservíveis: determinação em laboratório das características do asfalto modificado SBS comparadas às do asfalto com pó de borracha**. 2012. 97 p., Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Bauru, São Paulo, SP.

ANDERSON, M.; D'ANGELO, J.; WALKER, D. **MSCR: A better tool for characterizing high temperature performance properties**. EUA. Asphalt, v. 25, n.2, p. 15-16, 2010.

ASLI, H.; KARIM, M. R. **Implementation of waste cooking oil as RAP rejuvenator**. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies. Malaysia. v. 9, p. 1336-1350. 2011.

ASLI, H.; AHMADINIA, E.; ZARGAR, M.; KARIM, M. R. **Investigation on physical properties of waste cooking oil – Rejuvenated bitumen binder**. Construction and Building Materials. Malaysia. n. 37, p. 398-405. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.235:** Materiais asfálticos – Determinação do efeito do calor e do ar em uma película delgada rotacional: Rio de Janeiro, 2009.

ASTM D2872 – 12 (2013) Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test). American Society for Testing and Materials.

ASTM D4402 – 06 (xxxx) Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer. American Society for Testing and Materials.

ASTM D6373 – 15 (2008) Standard Specification for Performance Grades Asphalt Binder. American Society for Testing and Materials.

ASTM D7405 – 10a (2008) Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer. American Society for Testing and Materials.

AZAHAR, W. N. A. W.; BUJANG, M.; JAYA, R. P.; HAININ, M. R.; MOHAMED, A.; NGADI, N.; JAYANTI, D. S. **The potencial of waste cooking oil as bio-asphalt for alternative binder – an overview.** Jurnal Teknologi. Malaysia. v. 78, n. 4, p. 111-116, 2016.

BAHIA, H. U.; ANDERSON, D. A. **Strategic highway research program binder rheological parameters: background and comparison with conventional properties.** Transportation Research Record. n. 1488, p. 32-39, 1995.

BERNUCCI, L. B; MOTTA L. M. G. da; CERATTI J. A. P.; SOARES J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros.** Rio de Janeiro, 2007. 338 p., ISBN 85-85227-84-2.

BRASIL. Decreto nº 6.263, de 21 de novembro de 2007. Institui o Comitê Interministerial sobre Mudança do Clima – CIM, orienta a elaboração do Plano

Nacional sobre Mudança do Clima, e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**. Brasília DF, 22 nov 2007. Disponível em: <<http://www.pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?jornal=1&pagina=5&data=22/11/2007>> . Acesso em: 08 maio 2016.

BRASIL. Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC e dá outras. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**. Brasília DF, 29 dez 2009. Disponível em: <<http://www.pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?jornal=1000&pagina=109&data=29/12/2009>> . Acesso em: 08 maio 2016.

BRASIL. Resolução RDC nº 482, de 23 de setembro de 1999. Aprova o Regulamento Técnico para Fixação de Identidade e Qualidade de Óleos e Gorduras Vegetais. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 13 out 1999. Seção 1, p. 82.

BRINGEL, R. M. **Estudo químico e reológico de ligantes asfálticos modificados por polímero e aditivos**. 2007. 174 p. Dissertação (Mestrado em Química Inorgânica). Universidade Federal do Ceará. Fortaleza.

BUDNY, J. **Avaliação do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas Mornas**. 2012. 137 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.

CANCIAM, C. A.; Efeito da temperatura na viscosidade de óleos vegetais refinados. **Revista Exatas Terra**, Brasil, v. 16, n. 01, p. 07-12, 2010.

CAPITÃO, S.D.; PICADO-SANTOS, L.G.; MARTINHO, F. **Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt**. Construction and Building Materials. Portugal. n. 36, p. 1016-1024, 2012.

CELLA, R. C. F.; REGITANO-D'ARCE, M. A. B.; SPOTO, M. H. F. **Comportamento do óleo de soja refinado utilizado em fritura por imersão com**

alimentos de origem vegetal. Ciência e Tecnologia de alimentos. Campinas. n. 22, p. 111-116, 2002.

CHEN, M.; XIAO, F.; PUTMAN, B.; LENG, B; WU, S. **High temperature properties of rejuvenating recovered binder with rejuvenator, waste cooking and cotton seed oils.** Construction and Building Materials. China. n. 59, p. 10-16, 2014a.

CHEN, M.; LENG, B.; WU, S.; SANG, Y. **Physical, chemical and rheological properties of waste edible vegetable oil rejuvenated asphalt binders.** Construction and Building Materials. China. n. 66, p. 286-298, 2014b.

CNT. **Pesquisa CNT de Rodovias 2015 – Relatório Gerencial.** Brasília, DF, 2015. Disponível em: < <http://www.pesquisarodovias.cnt.org.br/Paginas/relatorio-gerencial>>. Acesso em: 08 maio 2016.

CONAB. **Observatório Agrícola – Acompanhamento da safra brasileira de grãos.** v. 3, Safra 2015/2016, n. 4, 154 p. Brasília, DF, 2016. Disponível em: < http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16_01_12_09_00_46_boletim_graos_janeiro_2016.pdf>. Acesso em: 08 maio 2016.

CUNHA, T. M. F.; CORREIA, J. C.; FROTA, C. A.; CHAAR, S. M.; COUCEIRO, P. R. C.; **Efeito da Adição de Material Vegetal (Fibra da Castanha de Cutia) e Polímero (SBS) nas Propriedades do Ligante Asfáltico (CAP 50/70).** Polímeros. Manaus. v. 22, n. 4, p. 345-351, 2012

D'ANGELO, J.; HARM, E.; BARTOSZEK, J.; BAUMGARDNER, G.; CORRIGAN, M.; COWSERT, J.; HARMAN, T.; JAMSHIDI, M.; JONES, W.; NEWCOMB, D.; PROWELL, B.; SINES, R. and YEATON, B. **Warm-Mix Asphalt: European Practice.** American Trade Initiatives, Alexandria, VA, EUA, 68 p., fevereiro 2008a.

D'ANGELO, J. A. **The multiple stress creep recovery (MSCR) procedure.** Technical Brief prepared by the United States Department of Transportation, Federal Highway Administration. 2011

DEAGRO-FIESP. **Informativo DEAGRO – Safra Mundial de Milho 2015/2016 – 12º Levantamento do USDA.** São Paulo, SP, 2016. Disponível em: <<http://www.fiesp.com.br/indices-pesquisas-e-publicacoes/safra-mundial-de-milho-2/>>. Acesso em: 08 maio 2016.

DEAGRO-FIESP. **Informativo DEAGRO – Safra Mundial de Soja 2015/2016 – 12º Levantamento do USDA.** São Paulo, SP, 2016. Disponível em: <<http://www.fiesp.com.br/indices-pesquisas-e-publicacoes/safra-mundial-de-soja/>>. Acesso em: 08 maio 2016.

DEDENE, C. D. **Investigation of using waste engine oil blended with reclaimed asphalt materials to improve pavement recyclability.** 2011. 83 p. Thesis (Master of Science Civil Engineering) – Michigan Technological University. Michigan, EUA.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE
DNIT – 095/2006 – EM, **Cimentos asfáltico de petróleo – Especificação de material**, Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE
DNIT – 129/2011 – EM, **Cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero elastomérico – Especificação de material**, Rio de Janeiro, 2011.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE
DNIT – 131/2010 – ME, **Materiais asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola – Método de ensaio**, Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE
DNIT – 155/2010 – ME, Material **asfáltico – Determinação da penetração – Método de ensaio**, Rio de Janeiro, 2010.

DOMINGOS, M. D. I. **Caracterização do comportamento fluência-recuperação de ligantes asfálticos modificados virgens e envelhecidos**. 2011. 300 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC/USP). São Carlos, São Paulo, SP.

DOMINGOS, M. D. I.; NG, A. K. Y.; FAXINA, A. L. **Comportamento fluência-recuperação de ligantes asfálticos modificados com polietileno de baixa densidade e ácido polifosfórico**. In: XXVIII ANPET – Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2014, Curitiba. XXVIII ANPET – Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2014.

DOMINGOS, M. D. I.; FAXINA, A. L.; **Comportamento fluência-recuperação de ligantes asfálticos modificados com copolímero SBR e ácido polifosfórico**. Transportes. São Paulo. v. 23, n. 2, p. 56-64, 2015

EMBRAPA. Agência Embrapa de informação Tecnológica. Disponível em: <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/agroenergia/arvore/CONT000fbl23vmz02wx5eo0sawqe3vtidl7vi.html>>. Acesso em: 08 maio 2016.

FAXINA, A. L. **Estudo da viabilidade técnica do uso do resíduo de óleo de xisto como óleo extensor em ligantes asfalto-borracha**. 2006. 286 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC/USP). São Carlos, São Paulo, SP.

FERNANDES, M. R. S. **Efeito de aditivo tipo óleo e enxofre na reologia de asfaltos modificados com SBS**. 2009. 118 p. Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre, RS.

FUENTES, P. H. A. **Avaliação da qualidade de óleos de soja, canola, milho e girassol durante o armazenamento**. 2011. 98 p. Dissertação (Mestrado

em Ciência dos Alimentos) - Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis, SC.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ (IAL). **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. Coordenadores Odair Zenebon, Neus Sadocco Pascuet e Paulo Tigela, 4ª edição, v. I, 1020 p., São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008.

JORGE, N.; SOARES, B. B. P.; LUNARDI, V. M.; MALACRIDA, C. R. **Alterações físico-químicas dos óleos de girassol, milho e soja em frituras**. Química Nova. Brasil, v. 28, n. 6, p. 947-951, 2005.

KAMARUDDIN, N. H. M.; H.; HASSAN, N. A.; ABDULLAH, M. E.; YAACOB, H. **Evaluation of pavement mixture incorporating waste oil**. Jurnal Teknologi. Malaysia, n. 71:3 p. 93-98, 2014.

KRISTJANSDOTTIR, O. **Warm Mix Asphalt for Cold Weather Paving**. 2006. 92 p. Thesis (Master of Science in Civil Engineering) – University of Washington. Washington, USA.

LEI, Z.; BAHIA, H.; YI-QIU, T. **Effect of bio-based and refined waste oil modifiers on low temperature performance of asphalt binders**. Construction and Building Materials. EUA, n. 86 p. 95-100, 2015.

LUCENA, L. C. F. L.; SILVEIRA, I. V.; COSTA, D. B. Avaliação de ligantes asfálticos modificados com óleo da *Moringa Oleífera Lam* para uso em misturas mornas. **Revista Matéria**, Brasil, v. 21, n. 01, p. 72-82, 2016.

MAHARAJ, R.; HARRY, V.; MOHAMED, N. **The rheological properties of Trinidad asphaltic materials blended with waste cooking oil**. Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology. Trinidad e Tobago, v. 31, n. 4, p. 265-278, 2015.

MAHARAJ, REAN.; RAMJATTAN-HARRY, V.; MOHAMED, N. **Rutting and fatigue cracking resistance of waste cooking oil modified Trinidad asphaltic**

materials. The Scientific Word Journal. Trinidad e Tobago, v. 2015, Article ID 385013, 7 pages, 2015.

MELO, M. A. M. F. **Avaliação das propriedades de óleos vegetais visando a produção de biodiesel.** 2010. 114 p. Dissertação (Mestrado em Química). Universidade Federal da Paraíba(UFPB). João Pessoa, Paraíba, PB.

MOREA, F.; MARCOZZI, R.; CASTAÑO, G. **Rheological properties of asphalt binders with chemical tensoactive additives used in Warm Mix Asphalts (WMAs).** Construction and Building Materials. Argentina, n. 29, p. 135-141, 2012.

MORILHA JÚNIOR, A. **Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas.** 2004. 165 p., Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, Santa Catarina, SC.

MOTHÉ, M. G. **Estudo do comportamento de ligantes asfálticos por reologia e análise térmica.** 2009. 182 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ.

MOTTA, R. S. **Estudo de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimentos para a redução de emissão de poluentes e consumo energético.** 2011. 229 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Transporte) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). São Paulo, SP.

MOTTA, R. S.; BERNUCCI, L. L. B.; FARIA, V. C.; SOUZA, D. R.; LEAL, J. F. **Estudo de mistura asfáltica morna como revestimento de pavimento: Aplicação na Rodovia Presidente Dutra.** In: 7º Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões, 2011, Foz do Iguaçu. 3º Salão de Inovação ABCR, 2011.

NEGRÃO, D. P. **Estudo de asfaltos modificados por polímeros do tipo RET para aplicações em pavimentos**. 2006. 160 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP.

ORTIZ, O. J. R; PUMAREJO, L. G. F; MORENO-TORRES, O. H. **Comportamiento de mesclas asfálticas fabricadas com asfaltos modificados com ceras**. Ingeniería y Desarrollo, Colômbia, v. 31, n. 1, p. 161-178, jun. 2013.

OTTO, G. G. **Misturas asfálticas mornas: verificação da fadiga e do módulo complexo**. 2009. 179 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina, SC.

PAMPLONA, T. F.; SOBREIRO, F. P.; FAXINA, A. L.; FABBRI, G. T. P. **Propriedades reológicas sob altas temperaturas de ligantes asfálticos de diferentes fontes modificados com ácido polifosfórico**. Transportes, v. 20, n. 4, p. 5-11, 2012.

PAMPLONA, T. F. **Efeito da adição de ácido polifosfórico em ligantes asfálticos de diferentes fontes**. 2013. 217 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo (EESC/USP). São Carlos, São Paulo, SP.

PODOLSKY, J. H.; BUSS, A.; WILLIAMS, R. C.; COCHRAN, E. W. **The rutting and stripping resistance of warm and hot mix asphalt using bio-additives**. Construction and Building Materials. p. 128-139. 2016.

REZENDE, D. F. **Estudo comparativo de características físico-químicas e nutricionais da soja preta e amarela**. 2012. 118 p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos). Universidade de São Paulo. São Paulo, SP.

RUBIO, M. C; MORENO, F; MARTINEZ-ECHEVARRIA, M. J; MARTINEZ, G. **Comparative analysis of emissions from the manufacture and use of hot and half-warm mix asphalt**. Journal of Cleaner Production. Espanha. n. 41, p. 1-6. 2013.

RUBIO, M. C; MORENO, F; BAENA, L; MARTINEZ, G. **Warm mix asphalt: an overview**. Journal of Cleaner Production. Espanha. n. 24, p. 76-84, 2012.

SALES, P. M. **Avaliação das características físicas e mecânicas de misturas asfálticas modificadas com adição do CCBit**. 2015. 90 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande(UFCG). Campina Grande, Paraíba, PB.

SEIDEL, J. C.; HADDOCK, J. E. **Rheological characterization of asphalt binders modified with soybean fatty acids**. Construction and Building Materials. EUA. n. 53, p. 324-332, 2013.

SILVA, J. P. S. **Avaliação dos efeitos de produtos rejuvenescedores em misturas asfálticas**. 2011. 145 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade de Brasília. Brasília, DF.

SOUZA, L. J. S. **Estudo das propriedades mecânicas de misturas asfálticas com cimento asfáltico de petróleo modificado com óleo de mamona**. 2012. 106 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, Paraíba, PB.

SU, J. F.; QIU, J.; SCHLANGEN, E.; WANG, Y. Y. **Investigation the possibility of a new approach of using microcapsules containing waste cooking oil: *In situ* rejuvenation for aged bitumen**. Construction and Building Materials. China. n. 74, p. 83-92. 2014.

SULTANA, S.; BHASIN, A. **Effect of chemical composition on rheology and mechanical properties of asphalt binder**. Construction and Building Materials. EUA. n. 72, p. 293-300. 2014.

SUN, Z.; YI, J.; HUANG, Y.; FENG, D.; GUO, C. **Properties of asphalt binder modified by bio-oil derived from waste cooking oil**. Construction and Building Materials. China. n. 102, p. 496-504. 2016.

WEN, H.; BRUSAL S.; WEN, B. **Laboratory evaluation of waste cooking oil-based bioasphalt as an alternative binder for hot mix asphalt.** Journal of Materials in Civil Engineering. EUA, n. 25, p. 1432-1437, 2013.

YILDIRIM, Y. **Polymer modified asphalt binders.** Construction and Building Materials. EUA, n. 21, p. 66-72, 2007.

ZARGAR, M.; AHMADINIA, E.; ASLI, H.; KARIM, M. R. **Investigation of the possibility of using waste cooking oil as a rejuvenating agent for aged bitumen.** Journal of Hazardous Materials. Malaysia. p. 254-258. 2012.

ZHANG, J.; YANG, F.; PEI, J.; XU, S.; AN, F. **Viscosity-temperature characteristics of warm mix asphalt binder with Sasobit.** Construction and Building Materials. China. p. 34-39. 2015.